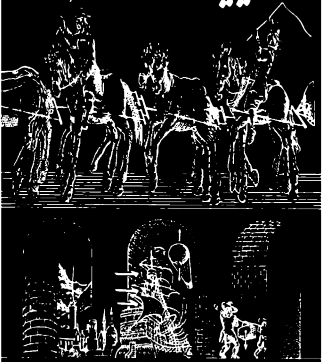
ل. لانداو. آ. کیتایگارودسکی

فیزیک برای همه



بنگاه نشریات میر - مسکو

فهرست

پیشگفتار

اولین پرسشی که در نخستین آشنائی با این کتاب برای هر کس مطرح میشود اینست که «برای همه» چه معنی دارد و برای کیست؟

البته در این نامگذاری قدری مبالغه شده است. برای خوانندهٔ این کتاب کافیست که با اصول جبر دوره دبیرستان آشنا باشد. معلومات فیزیک لزومی ندارد: این کتاب میتواند اولین کتاب فیزیک شما باشد و ضمنا حتی برای آن کسانی که فیزیک را بعنوان رشته تخصص خود برگزیده‌اند نیز میتواند مفید واقع شود.

ما کوشیده‌ایم که این کتاب را بزبانی سهل و ساده بنویسیم. ضمناً محض تفریح و سرگرمی از این دریغ نکرده‌ایم که با خواننده کمی هم شوخی بکنیم. ولی از همه اینها نباید چنین استنباط شود که کتاب «فیزیک برای همه»ی ما کتاب آسانی است. بسیاری از صفحات آنرا باید چندین بار با دقت خواند. برای درک فیزیک باید چه بسا عمیقا و با شدت به تفکر پرداخت.

در این کتاب به قوانین بنیادی و مفاهیم اساسی فیزیک توجه اصلی معطوف شده است. ولی ما از آوردن امثله و ذکر نمونه‌های توضیحی از زندگی و تکنیک کوتاهی نکرده‌ایم. البته باید بگوییم که منظور ما از این کار بهیچوجه این نبوده است که به عرصه بی‌پایان ضمایم فیزیک گام نهیم.

در پاره‌ای موارد با دادن برخی توضیحات از مطلب دور شده‌ایم. ولی این موارد صرفاً مربوط به مبانی فیزیک میباشند، نه بضمایم آن.

فعلا «فیزیک برای همه» بخشی از فیزیک را که مربوط به حرکت مکانیکی و ملکولی است دربر میگیرد. ما امیدواریم در آینده زیر همین عنوان کتابهای دیگری بدست خواننده برسانیم که در آنها از الکتریسیته، اپتیک و ساختار اتم صحبت میشود.

ل. لاندائو
آ. کیتایگارودسکی

مفاهیم اساسی

سانتیمتر و ثانیه

برای هر کس در زندگی مواردی پیش می‌آید که باید درازایی را اندازه بگیرد، زمانی را حساب کند و وزن اجسام مختلف را تعیین نماید. بنا بر این هر کس سانتیمتر و ثانیه و گرم را خوب میشناسد. اما برای یک فیزیکدان این اندازه‌گیریها دارای اهمیت ویژه‌ای هستند، چون برای قضاوت در مورد اکثر پدیده‌های فیزیکی ضرور میباشند. مردم سعی میکنند مسافات، فواصل زمانی و اوزان را که در فیزیک مفاهیم اساسی نامیده میشوند، هر چه ممکنست دقیقتر اندازه‌گیری کنند.

وسایل فیزیکی معاصر قادراند اختلاف درازای دو میلهٔ یک متری را، حتی اگر این اختلاف از یک میلیاردم متر هم کمتر باشد، معین کنند. فواصل زمانی را نیز که بقدر یک میلیونیم ثانیه با هم تفاوت داشته باشند، میتوان تمیز داد. یک ترازوی خوب وزن دانه خشخاش را با دقت زیاد اندازه میگیرد.

تکنیک اندازه‌گیریها از چند قرن پیش شروع به تکامل نموده، ولی از آن زمان که قطعه درازایی را بعنوان واحد درازا و وزن جسمی را بعنوان واحد وزن تعیین کردند، مدت چندانی نگذشته است.

این سؤال پیش می‌آید که چرا سانتیمتر و ثانیه با این اندازه‌هائی که ما میشناسیم تعیین شده‌اند؟ چون تفاوتی نمیکرد اگر سانتیمتر یا ثانیه را مثلاً درازتر و یا کوتاهتر از اندازه‌های کنونی تعیین میکردند.

واحد اندازه‌گیری باید مناسب باشد و غیر از این هیچ چیز

دیگری ما از آن نمیخواهیم. خیلی خوبست اگر واحد اندازه‌گیری دم دست انسان باشد. ساده‌تر از همه اینست که ما خود دست را بعنوان واحد اندازه‌گیری بگیریم. اتفاقا در ازمنه قدیم همین کار را هم میکردند. بهترین گواه این امر همانا اسامی واحدهای اندازه‌گیری قدیمی است. مثلا «وجب» — فاصلهٔ بین نوک انگشتهای بزرگ و کوچک دست در حالت انگشتهای کاملاً باز است. برای اندازه‌گیری درازا از پا هم استفاده میکردند و از اینجا نامگذاری «فوت» یا «پا» بمیان آمد که باندازهٔ درازای کف پا است («فوت» بزبان انگلیسی یعنی کف پا).

البته این واحدهای اندازه‌گیری از آن جهت که همیشه با انسان و در اختیار انسان هستند بسیار مناسبند، ولی با وجود این، نقایص کاملا آشکاری دارند. مهمتر از همه اینکه دستها و پاهای اشخاص مختلف یک اندازه نیستند. بنابر این استفاده از آنها بعنوان واحدهای اندازه‌گیری نمیتواند در عمل باعث بروز اختلافات و مشاجرات نشود و از این رو نمیتواند مورد قبول همگان قرار گیرد.

با گسترش دامنهٔ بازرگانی ضرورت توافق در بارهٔ واحدهای اندازه‌گیری بوجود آمد. ابتدا درون هر بازار بطور جداگانه، سپس در داخل یک شهر، بعد در یک کشور و بالاخره در تمام جهان معیارهای درازا و وزن مقرر گردید. معیار عبارتست از اندازه نمونه، مثلا خط‌کشی با درازای معین یا وزنه‌ای با سنگینی معین. دولت معیارها را با دقت تمام حفظ میکند و دیگر خط‌کشها و وزنه‌ها باید دقیقا از روی آن معیارها تهیه شوند.

در روسیه تزاری اندازه‌های اصلی وزن و درازا — این اندازه‌ها را «فونت» و «آرشین» مینامیدند — نخستین بار در سال ۱۷۴۷ میلادی* تهیه شد. در سدهٔ نوزدهم مساله‌ی دقت در اندازه‌گیریها اهمیت بیشتری کسب کرد و معیارهای مزبور دیگر کافی نبودند. کار دشوار و پرمسئولیت ایجاد معیارهای دقیق در سالهای ۱۸۹۸ — ۱۸۹۳ زیر رهبری د. ای. مندله‌یف انجام شد. شیمیدان بزرگ به تعیین

*از این ببعد تمام تواریخ میلادی بدون کلمهٔ میلادی ذکر میشود (هیئت تحریریه).

مقیاس دقیق زیاد اهمیت میداد. به ابتکار او در اواخر سدهٔ نوزدهم اطاق کل مقیاس‌ها و اوزان تاسیس گردید که معیارها در آن نگهداری و کپیه‌های آنها تهیه میشد.

بعضی فواصل و مسافات با واحدهای بزرگ بیان میشوند و برخی دیگر با واحدهای کوچکتر. بدیهیست که ما فاصله از تهران تا مشهد را هیچوقت با سانتیمتر و یا مثلاً وزن یک قطار راه‌آهن را هیچوقت با گرم اندازه نمیگیریم. بنابر این مردم در باره تناسبهای معینی بین واحدهای بزرگ و کوچک بتوافق آمدند. بطوریکه میدانیم در سیستم واحدهای مورد استفاده ما واحدهای بزرگ از واحدهای کوچک با مضارب ۱۰، ۱۰۰، ۱۰۰۰، ... تفاوت دارند که بطور کلی توانهای مختلف ۱۰ میباشند. این نسبتهای شرطی خیلی مناسبند و کلید محاسبات را آسان میکنند. ولی این سیستم سهل و مناسب در همه کشورها پذیرفته نشده است. در انگلستان و ایالات متحده امریکا با وجود تسهیلات مسلم سیستم متری، تا کنون از متر و سانتیمتر و کیلومتر و همچنین از گرم و کیلوگرم خیلی بندرت استفاده میشود.*

در سده هفدهم این فکر پدید آمد که معیاری انتخاب شود که در طبیعت وجود داشته باشد و با گذشت سالها و قرون تغییر نکند. در سال ۱۶۶٤ ک. هویگنس پیشنهاد کرد درازای آونگی که در هر ثانیه یک نوسان میکند بعنوان واحد درازا تعیین شود. تقریباً صد سال

---

*در انگلستان اندازه‌های زیر رسما پذیرفته شده‌اند: میل دریائی (برابر ۱۸۵۲ متر)، میل ساده (۱۶۰۹ متر)، فوت (۳۰,۵ سانتیمتر). فوت برابر ۱۲ اینچ و اینچ ۲,٥٤ سانتیمتر است. یارد برابر ۰,۹۱ متر است. این اندازه «خیاطی» است و مقدار پارچه لازم برای یکدست لباس با یارد اندازه گرفته میشود.

در کشورهای آنگلوساکسون وزن با پوند (برابر ٤٥٤ گرم) اندازه‌گیری میشود. اجزاء کوچک پوند عبارتند از اونس ($\frac{1}{16}$ پوند) و گرین ($\frac{1}{7000}$ پوند). از این اندازه‌ها داروسازان در توزین مواد داروئی استفاده میکنند.

بعد، در سال ۱۷۷۱، پیشنهاد شد که درازای راهی که جسمی با سقوط آزاد در یک ثانیه می‌پیماید، معیار درازا محسوب شود. ولی معلوم شد که این دو پیشنهاد نیز مناسب نیستند و بنابر این پذیرفته نشدند. انقلابی لازم بود تا اندازه‌های معاصر بوجود آیند، — کیلوگرم و متر مولود انقلاب کبیر فرانسه‌اند.

در سال ۱۷۹۰ مجلس مؤسسان کمیسیون ویژه‌ای از بهترین دانشمندان فیزیک و ریاضیات برای تهیه اندازه‌های واحد تشکیل داد. کمیسیون از میان انواع گوناگون پیشنهادهای مربوط به واحد درازا یک ده میلیونیم ربع نصف النهار زمین را برگزید و این واحد را «متر» نامید. در سال ۱۷۹۹ معیار متر تهیه شد و برای نگهداری به بایگانی جمهوری تحویل گردید.

ولی بزودی معلوم شد که فکر مناسب بودن تعیین اندازه‌های نمونه ماخوذه از طبیعت که بصورت مجرد صحیح بود، بطور کامل قابل اجرا نیست. اندازه گیریهای دقیقتر که در سده نوزدهم بعمل آمد نشان داد که معیار تهیه شده برای متر تقریباً ۰٫۰۸ میلیمتر کوتاهتر از یک چهل میلیونیم نصف‌النهار زمین است. معلوم شد که با پیشرفت و تکامل تکنیک اندازه گیری باز هم تصحیحات تازه‌ای بعمل خواهد آمد. با حفظ تعریف متر بعنوان جزئی از نصف‌النهار زمین، میبایست بعد از هر اندازه‌گیری جدید نصف‌النهار، معیارهای تازه‌ای تهیه شود و کلیه درازاها مجدداً محاسبه و تعیین گردند. باین جهت بعد از مذاکره در کنگره‌های بین‌المللی سالهای ۱۸۷۰، ۱۸۷۲ و ۱۸۷۵ تصمیم گرفته شد که واحد درازا بعوض یک چهل میلیونیم نصف‌النهار، همان معیار متری قبول شود که در سال ۱۷۹۹ تهیه شده بود و اکنون در دفتر بین‌المللی مقیاسها و اوزان در سور حفظ و نگهداری میشود.

تاریخچه متر به همین جا پایان نمی‌یابد. در حال حاضر تعیین این کمیت بنیادی بر پایه افکار و نظریات نوین فیزیک مبتنی است. اندازهٔ درازا بار دیگر از طبیعت گرفته میشود، منتها این بار به شیوه‌ای زیرکانه‌تر.

با تعیین متر اجزاء آن هم تعیین گشت: یک هزارم متر که میلیمتر نامیده میشود، یک میلیونیم متر که میکرون نامیده میشود و یک صدم متر که سانتیمتر نام دارد و بیشتر معمول و متداول است.

حالا چند کلمه از ثانیه صحبت کنیم. ثانیه خیلی قدیمی‌تر از سانتیمتر است. در تعیین واحد اندازه‌گیری زمان هیچ اختلاف نظری وجود نداشت. دلیلش هم کاملاً واضح است: تعویض شب و روز و دوران دائمی خورشید شیوهٔ طبیعی برگزینی واحد زمان را بدست میدهد. اصطلاح «تعیین وقت از روی خورشید» را هر کس خوب میداند. وقتی که آفتاب در ارتفاع بلند وسط آسمان قرار میگیرد، نیمروز یا ظهر است و تعیین این وقت نیز کار ساده‌ایست: کافیست چوبی را عمودی در زمین فرو کنیم و درازای سایه آنرا اندازه بگیریم و لحظه‌ای را که سایه بلندترین ارتفاع را دارد معین نمائیم. روز بعد هم با همان شیوه میتوانیم همان لحظه را معین کنیم. فاصله زمانی بین این دو لحظه یک شبانه روز است. بعد میتوان این فاصله را به ساعات و دقایق و ثوانی تقسیم کرد.

واحدهای بزرگ اندازه‌گیری، یعنی سال و شبانه‌روز را خود طبیعت به ما داده است، ولی ساعت و دقیقه و ثانیه را انسانها وضع کرده‌اند.

تقسیمات کنونی شبانه‌روز از اعصار کهن وجود داشته است. در بابل سیستم شصت قسمتی شمارش زمان معمول بود، نه سیستم ده قسمتی یا اعشاری. شصت به ۱۲ قابل تقسیم است و باقیمانده ندارد، بهمین جهت بابلیها شبانه روز را به دوازده قسمت برابر تقسیم کردند.

در مصر قدیم تقسیم شبانه‌روز به ۲۴ قسمت معمول بود. بعدها دقایق و ثوانی پدید آمدند. تقسیم ساعت به ۶۰ دقیقه و دقیقه به ۶۰ ثانیه نیز میراث سیستم شصت قسمتی بابل است.

در ازمنه قدیم و قرون وسطی زمان را بوسیله ساعتهای خورشیدی، ساعتهای آبی (از روی زمان ریزش آب از ظروف بزرگ) و دیگر وسایل مبتکرانه که همیشه جالب ولی بطور کلی فاقد دقت بودند، اندازه‌گیری میکردند.

بکمک ساعتهای معاصر بسهولت میتوان دانست که مدت زمان یک شبانه‌روز در مواقع مختلف سال کاملاً باهم برابر نیست. بنابر این قرار گذاشتند که مدت متوسط سالانه شبانه‌روز خورشیدی را بعنوان واحد اندازه‌گیری زمان بپذیرند. یک بیست و چهارم این فاصله زمانی متوسط سالانه، ساعت نامیده میشود.

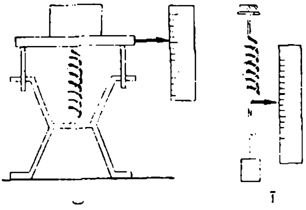
ولی باید متذکر شویم که ما با تقسیم شبانه‌روز به قسمتهای برابر و تعیین ساعت و دقیقه و ثانیه بعنوان واحدهای زمان، گردش کره زمین را یکنواخت فرض میکنیم، در صورتیکه مدهای اقیانوسها توسط ماه و خورشید گردش زمین را — ولو بقدر ناچیز — کند میکنند. این بدانمعناست که مدت شبانه روز، یا واحد زمانی که ما تعیین کرده‌ایم، پیوسته رو به افزایش است.

این کند شدن گردش کره زمین بقدری ناچیز است که میزان آنرا فقط در این اواخر، بعد از اختراع ساعتهای اتمی که فواصل زمانی را با دقت فوق‌العاده زیاد — تا یک میلیونیم ثانیه — اندازه میگیرند، توانستند تعیین کنند. معلوم شد که تغییر مدت شبانه روز به ۱ تا ۲ هزارم ثانیه در ظرف ۱۰۰ سال میرسد.

ولی معیار باید در صورت امکان حتی از این بی‌دقتی ناچیز هم مبرا باشد. بموجب آخرین تعریف، ثانیه برابر $\frac{۱}{۳۱۵۵۶۹۲۵٫۹۷۴۷}$ سال کاملاً معین است، نه جزئی از شبانه‌روز خورشیدی متوسط.

وزن و جرم

وزن نیروئی است که جسم با آن بطرف زمین کشیده میشود. این نیرو را میتوان با ترازوی فنری اندازه گرفت. هر اندازه وزن جسم بیشتر باشد، فنری که جسم به آن آویخته است بیشتر کشیده میشود. با کمک وزنه‌ای که بعنوان واحد وزن قبول شده است میتوان دستگاه فنری را درجه‌بندی کرد، یعنی برحسب اینکه فنر زیر تأثیر اوزان یک کیلوگرم، دو کیلوگرم، سه، چهار و الخ چقدر کشیده شده است آنرا علامت‌گزاری نمود. بعد، اگر جسمی را به این ترازو بیاویزیم، از روی درجهٔ کشیدگی فنر میتوان نیروی کشش آنرا توسط زمین به کیلوگرم پیدا کرد (شکل ۱ — الف). برای اندازه‌گیری وزن میتوان نه فقط از فنر باز شونده، بلکه از فنر جمع شونده نیز استفاده کرد (شکل ۱ — ب). با استفاده از فنرهای با ضخامتهای مختلف میتوان ترازوهائی برای توزین اجسام با اوزان مختلف — چه بسیار سنگین

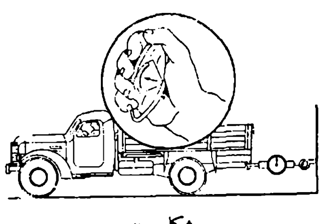


شکل ۱

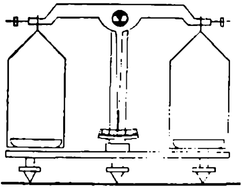
و چه خیلی سبک — درست کرد. ساختمان انواع ترازوها — نه فقط ترازوهای خشن بازرگانی، بلکه همچنین وسایل بسیار دقیق که در اندازه‌گیریهای فیزیکی بکار می‌روند — بر این اصل مبتنی میباشند.

با دستگاه فنری درجه‌بندی شده میتوان نه فقط نیروی جاذبه زمین، یا وزن جسم، بلکه دیگر نیروها را هم اندزاه‌گیری کرد. چنین دستگاهی دینامومتر یا نیروسنج نامیده میشود. بسیاری اشخاص دیده‌اند که چطور نیروسنج برای سنجش نیروی عضلات انسان بکار میرود. نیروی کشش موتور را هم میتوان به آسانی با استفاده از خاصیت ارتجاعی فنر اندازه گرفت (شکل ۲).

وزن جسم یکی از خواص بسیار مهم آنست. ضمنا وزن فقط به خود جسم مربوط نیست. چون جسم در میدان جاذبه زمین قرار دارد. اگر ما در کرهٔ ماه باشیم؟ مسلما وزن جسم مقدار دیگری — بطوریکه



شکل ۲



شکل ۳

محاسبات نشان میدهد، تقریباً ۶ بار کمتر — خواهد بود. در خود کره زمین هم وزن جسم در عرضهای جغرافیائی مختلف متفاوتست. مثلا وزن اجسام در قطب ۵٫۰ درصد بیشتر از وزن آنها در استوا است.

ولی وزن با تمام تغییرپذیریش دارای این ویژگی بسیار مهم است که نسبت اوزان دو جسم، بطوریکه تجربه نشان میدهد، در هر شرایطی ثابت و بلاتغییر میماند. اگر دو وزنه مختلف فنر ترازوئی را در قطب به یک اندازه بکشند، این یگانگی و همتائی در استوا هم دقیقا حفظ میشود.

اگر وزن را از طریق مقایسه آن با وزن معیار اندازه بگیریم، در این صورت یک ویژگی تازهٔ اجسام بدست می‌آید که آنرا جرم میگویند.

معنای فیزیکی این مفهوم تازه — جرم — با آن یگانگی و همتائی که ما هم اکنون در مقایسه اوزان به آن اشاره کردیم بستگی نزدیک دارد.

جرم، برخلاف وزن، خاصیت تغییرناپذیر جسم است که به هیچ چیز غیر از خود آن جسم بستگی ندارد.

مقایسه اوزان، یعنی اندازه‌گیری جرم را بهتر از همه میتوان با ترازوی شاهین‌دار معمولی انجام داد (شکل ۳). ما موقعی میگوئیم اجرام دو جسم برابراند که شاهین ترازوئی که این دو جسم در دو کفهٔ آن قرار داده شده‌اند، کاملاً در حال تعادل باشد. اگر باری را در ترازوی شاهین‌دار در استوا وزن کنیم و بعد آن بار و سنگهای ترازو را به قطب ببریم، در آنجا، هم بار و هم سنگها وزنشان یکسان تغییر میکند. بنا بر این اگر جسم را در قطب وزن کنیم، باز هم همان نتیجه بدست خواهد آمد، یعنی شاهین ترازو به حال تعادل خواهد ایستاد.

برای وارسی این وضعیت ما میتوانیم عازم کرهٔ ماه هم بشویم. در آنجا هم نسبت اوزان اجسام تغییر نمی‌کند، بنا بر این اگر آن بار

را در کره ماه روی ترازو بگذاریم، باز هم با همان سنگها توزین میشود. از اینجا معلوم میشود که جرم جسم، صرفنظر از محل و مکان آن کمیت ثابتی است.

واحدها و جرم‌ها و اوزان به این بستگی دارند که ما چه وزنه معیاری را برگزیده باشیم. در بارهٔ جرم هم درست مثل آنچه که در باره متر و ثانیه گفته شد، مردم در جستجوی یک معیار طبیعی بودند. همان کمیسیون نامبرده بالا، وزنه‌ای از همبسته معین تهیه کرد که وزن آن در ترازوی شاهین‌دار معادل بود با وزن یک دسیمتر مکعب آب با گرمای چهار درجه سانتیگراد.* این معیار را کیلوگرم نامیدند.

ولی بعد معلوم شد که «برداشتن» یک دسیمتر مکعب آب هم چندان کار ساده‌ای نیست، بدلیل آنکه اولاً، دسیمتر بمثابه جزئی از متر در هر تغییر و تدقیق معیار متر تغییر میکند، ثانیاً، مساله خود آب در میان است که چگونه آبی باید باشد؟ آیا باید از لحاظ شیمیائی تمیز باشد؟ دو بار تقطیر شده باشد؟ هوا نداشته باشد؟ پس مخلوطهای «آب سنگین» چطور؟ علاوه بر همهٔ اینها دقت اندازه‌گیری حجم بطور چشمگیری از دقت توزین کمتر است.

باین ترتیب مجبور شدند باز هم از واحد طبیعی صرفنظر کنند و جرم وزنه‌ای را که بویژه برای این کار تهیه کردند بعنوان معیار جرم بپذیرند. این وزنه نیز با معیار متر در پاریس نگهداری میشود.

برای اندازه‌گیری جرم، اجزاء هزارم و میلیونیم کیلوگرم، یعنی گرم و میلی‌گرم، بطور وسیع بکار میرود. وزن این وزنه معیار را در مدار ۴۵ درجه کره زمین یک کیلوگرم مینامند و آنرا با علامت kgf نمایش میدهند. جرم این وزنه را نیز کیلوگرم مینامند و آنرا با علامت kg نمایش میدهند.

---

*برگزینی این درجه گرما تصادفی نیست. مساله از این قرار است که حجم آب در اثر گرمایش بطرز خاصی، متمایز از غالب اجسام، تغییر میکند. معمولاً اجسام در اثر گرمایش منبسط میشوند، ولی آب در صورت افزایش گرما از صفر تا ۴ درجه منقبض می‌گردد و بمحض اینکه گرما از ۴ درجه بالا رود، شروع به انبساط میکند. بدینسان ۴ درجه، گرمائی است که در آن درجه، آب دیگر منقبض نمی‌شود و شروع به انبساط میکند.

kgf نمایش میدهند. در کره ماه جرم این وزنه همان ۱ kg خواهد بود، ولی وزن آن تغییر خواهد کرد و تقریباً ۰٫۱۷ kgf خواهد شد. باین ترتیب واحدهای اندازه‌گیری نیرو و جرم نام واحد دارند و این همنامی در فهم «روابط متقابل» وزن و جرم سردرگمی جدی بوجود می‌آورد. برای روشن کردن این مسائل در کنفرانسهای عمومی دهم و یازدهم مقادیر و اوزان (سال ۱۹۶۰)، سیستم بین‌المللی جدید واحدها (SI) تعیین گردید و بعد اکثر کشورها آنرا بعنوان استانداردهای دولتی پذیرفتند. در سیستم جدید نام کیلوگرم را (kg) برای جرم حفظ کردند. هر نیروئی، و از آنجمله هم البته وزن، در سیستم نو با نیوتن (n) اندازه‌گیری میشود. ما کمی بعد، توضیح خواهیم داد که چرا این واحد نیوتن نامیده شده و تعریف آن چیست.

البته این سیستم نو فوری در همه جا بکار برده نمیشود و بنابر این فعلاً لازمست خاطرنشان شود که کیلوگرم جرم (kg) و کیلوگرم نیرو (kgf) دو واحد مختلفند و عملیات ریاضی با آنها را باید همانند ارقام واحدهای با نامهای مختلف انجام داد. مثلا اگر بنویسیم

$$4\,kg + 3\,kgf = 7$$

محاسبه ما همانقدر نادرست و بیمعنی خواهد بود که مثلا اگر متر را با ثانیه جمع کنیم.

چگالی

همه شما این اصطلاح را شنیده‌اید که میگویند: سنگین است مثل سرب، یا اینکه سبک است مثل پرکاه. البته واضحست که اگر ذره‌ای از سرب را بگیریم سبک خواهد بود و اگر کوهی از کاه را برداریم جرم زیادی خواهد داشت. آنها که چنین تشبیهاتی را مثال می‌آورند، منظورشان جرم اجسام نیست، بلکه چگالی موادی است که جسم از آنها تشکیل یافته است.

چگالی جسم عبارتست از جرم واحد حجم. واضحست که چگالی سرب چه در ذرهٔ کوچکی از سرب و چه در قطعه حجیم و بزرگی از آن یکی است.

برای بیان چگالی معمولاً مشخص میکنند که یک سانتیمتر مکعب (cm^3) جسم چند گرم (g) وزن دارد، و آنوقت بعد از رقم وزن علامت g/cm^3 را مینویسند. برای تعیین چگالی باید وزن برحسب گرم را به حجم برحسب سانتیمتر مکعب تقسیم کرد؛ خط کسری در این علامت مبین همین است.

فلزهائی نظیر اسمیم با چگالی برابر g/cm^3 ۲۲٫۵، ایریدیم (۲۲٫٤)، پلاتین (۲۱٫۵)، ولفرام و طلا (۱۹٫۳) را میتوان در ردیف سنگین‌ترین مواد نام برد. چگالی آهن برابر ۷٫۸۸ و مس ۸٫۹۳ است.

سبکترین فلزات عبارتند از منیزیم (۱٫۷٤)، بریلیم (۱٫۸۳) و آلومینیم (۲٫۷۰). اجسام باز هم سبکتری را میتوان در میان اجسام آلی یافت: انواع گوناگون چوب و مواد پلاستیک میتوانند چگالی پایینتر از ۰٫٤ داشته باشند.

باید متذکر گشت که این صحبت ما در باره اجسام یکپارچه است. اگر جسم جامد خلل و فرج داشته باشد، بدیهیست سبکتر خواهد شد. در تکنیک، در بسیاری موارد از اجسام متخلخل مثل چوب پنبه و کف‌شیشه استفاده میشود. چگالی کف‌شیشه میتواند کمتر از ۰٫۵ باشد، در صورتیکه چگالی جسم جامدی که کف‌شیشه از آن بدست آمده است بیشتر از یک میباشد. کف‌شیشه هم مثل همه اجسامی که چگالیشان کمتر از یک است بخوبی روی آب میایستد. سبکترین مایعات هیدرژن مایع است. آنرا فقط میتوان در درجات گرمای خیلی پائین بدست آورد. یک سانتیمتر مکعب هیدرژن مایع جرمی برابر ۰٫۰۷ گرم دارد. مایعهای آلی الکل، بنزین، نفت سفید — از لحاظ چگالی فرق زیادی با آب ندارند. جیوه خیلی سنگین است. چگالی آن g/cm^3 ۱۳٫٦ میباشد.

حالا ببینیم چگالی گازها چطور معلوم میشود؟ چون بطوریکه میدانیم، گازها را در هر ظرفی قرار دهیم، حجم آن ظرف را اشغال میکنند. اگر جرم معین گاز را که در سیلندر قرار دارد داخل ظروفی با حجمهای مختلف بکنیم، در هر حالت آن گاز تمام گنجایش‌هر یک از آن ظرفها را بطور یکنواخت پر میکند. پس در این صورت چگالی گاز چه خواهد بود؟

چگالی گازها را در شرایط متعارفی یا عادی یعنی در گرمای صفر درجه و فشار یک آتمسفر تعیین میکنند. در شرایط متعارفی، چگالی هوا

برابر g/cm^3 ۰,۰۰۱۲۹ و چگالی کلر — g/cm^3 ۰,۰۰۳۲۲ است.
گاز هیدرژن مثل هیدرژن مایع دارای کمترین چگالی است، یعنی سبکترین گاز میباشد. چگالی آن برابر g/cm^3 ۰,۰۰۰۰۹ است.

سبکترین گاز بعد از هیدرژن هلیوم است که دو بار سنگینتر از هیدرژن میباشد. گاز کربنیک یک بار و نیم سنگینتر از هوا است. در ایتالیا، نزدیک شهر ناپل، غار مشهوری هست بنام «غار سگ» که از قسمت پائین آن دائماً گاز کربنیک خارج میشود. این گاز چون از هوا سنگینتر است، در همان پائین غار پخش شده و آهسته آهسته از غار خارج میشود. انسان به آسانی و بلا مانع میتواند وارد غار شود، ولی برای سگ ورود به غار عاقبت بدی خواهد داشت. بهمین جهت هم آنرا «غار سگ» نامیده‌اند.

چگالی گازها در برابر شرایط خارجی از جمله فشار و گرما خیلی حساس و تغییرپذیر است. بنا بر این تعیین مقادیر چگالی گازها بدون ذکر شرایط خارجی بیمعنی است. چگالی مایعات و اجسام جامد نیز به گرما و فشار بستگی دارد. ولی این بستگی، در مقایسه با گازها، خیلی کمتر است.

قانون بقاء جرم

اگر مقداری قند را در آب حل کنیم، جرم محلول برابر خواهد بود با مجموع جرمهای قند و آب.

این آزمایش و آزمایشهای بیشمار دیگری که در این زمینه صورت گرفته نشان داده است که جرم جسم کیفیتی است ثابت و تغییرناپذیر. اگر جسم را بهر صورتی خرد کنیم و یا حل نمائیم، جرم آن تغییر نخواهد کرد.

در کلیه تبدیلات شیمیائی نیز همینطور است. زغال میسوزد. با توزین‌های دقیق میتوان فهمید که جرم زغال و اکسیژن هوا که برای احتراق مصرف شده، با جرم محصولات احتراق دقیقاً برابر است.

قانون بقاء جرم آخرین بار در اواخر سدهٔ نوزدهم که فن توزین دقیق خیلی پیشرفت کرده بود مورد وارسی قرار گرفت. در نتیجه معلوم شد که جرم در هیچگونه تبدیل شیمیائی حتی باندازه یک صد میلیاردم مقدار خود هم تغییر نمیکند.



میخائیل واسیلیویچ لومونوسف (۱۷۱۱ — ۱۷۶۵) دانشمند برجسته روس، بنیادگزار علم در روسیه و روشنگر و دانش پروری بزرگ بود. لومونوسف در رشته فیزیک علیه تصورات رایج سده هیجدهم در باره «مایعات» برقی و حرارتی بشدت مخالفت میورزید و از نظریه سینتیک ملکولی ماده دفاع میکرد. لومونوسف برای نخستین بار قانون بقاء جرم موادی را که در تبدیلات شیمیائی شرکت میکنند، بطور تجربی اثبات کرد. لومونوسف پژوهشهای گسترده‌ای در زمینهٔ الکتریسیته جو و هواشناسی بعمل آورد. او وسایل بصری بسیار خوبی ساخت و وجود جورا در کره زهره کشف کرد. لومونوسف زبان علمی روسی را بنیاد نهاد و توانست اصطلاحات اساسی فیزیکی و شیمیائی را با موفقیتی شایان از زبان لاتینی به روسی برگرداند.

در عهد باستان دانشمندان جرم را بلا تغییر میدانستند. نخستین بار این قانون در سال ۱۷۵۶ در تجربه مورد وارسی حقیقی قرار گرفت. این کار را م. و. لومونوسف انجام داد. وی در سال ۱۷۵۶ ضمن آزمایشهائی چند، بقاء جرم فلز را بهنگام تشویه آن اثبات کرد.

جرم کیفیت بسیار مهم و تغییرناپذیر جسم است. میتوان گفت که بیشتر خواص اجسام، در دست انسان است. آهن نرمی را که با دست خم میشود میتوان با آب دادن، سخت و شکننده کرد. محلول تیره‌ای را بوسیله فرا صوت میتوان شفاف کرد. خواص مکانیکی و برقی و حرارتی اجسام در نتیجه تأثیرات خارجی تغییر میکنند. ولی هر قدر هم جسمی را زیر انواع تأثیرات خارجی قرار دهیم، اگر از پیکر جسم چیزی گرفته نشود و یا به آن چیزی علاوه نگردد، تغییر جرم جسم غیر ممکن است.*

عمل و عکس العمل

ما غالباً به این نکته توجه نمیکنیم که هر عملی با عکس العمل همراه است. اگر چمدانی را روی تختخواب فنری بگذاریم، تختخواب پائین میرود. این که وزن چمدان روی تختخواب تأثیر میکند بر همه کس روشن است. ولی گاه این نکته فراموش میشود که از طرف تختخواب هم به چمدان نیروئی وارد می‌آید. چون بطوریکه می‌بینیم، چمدان روی تختخواب قرار گرفته است و نمی‌افتد. این به آن معناست که از طرف تختخواب به چمدان نیروئی برابر وزن چمدان رو به بالا وارد می‌آید.

نیروهائی را که در جهت معکوس نیروی جاذبهٔ زمینند، غالباً عکس العمل یا واکنش سطح اتکاء مینامند و این هر دو واژه بمعنای «عمل جوابیه» است. تأثیر میز بر کتابی که روی آن قرار گرفته و تأثیر تختخواب بر چمدانی که روی آن گذاشته شده است، واکنشهای سطح اتکاءاند.

---

*در این حکم برخی محدودیتها هست که ما بعداً به آن اشاره میکنیم.

بطوریکه در بالا گفته شد، وزن جسم را با ترازوی فنری تعیین میکنند. فشار وارده از جسم بر فنری که زیر آن قرار دارد و یا نیروئی که بار آویخته به فنر بر فنر وارد می‌آورد و آنرا میکشد، با وزن جسم برابراند. ضمناً انقباض یا انبساط فنر در عین حال مقدار واکنش سطح اتکاء را هم نشان میدهد.

بنا بر این، وقتی ما مقدار نیروئی را بوسیله فنر اندازه میگیریم، در واقع مقدار دو نیرو را که در جهات متقابل قرار دارند تعیین میکنیم. ترازوی فنری هم فشار بار بر کفه ترازو را اندازه میگیرد، و هم واکنش سطح اتکاء را، یعنی تأثیر کفه ترازو را روی بار. اگر یک سر فنری را به دیوار محکم کنیم و سر دیگر آنرا با دست بکشیم، ما میتوانیم نیروئی را که با آن، دست ما فنر را میکشد و در عین حال نیروئی را که با آن فنر، دست ما را میکشد اندازه بگیریم.

باین ترتیب، نیروها دارای خاصیت جالبی هستند، بدینمعنی که همیشه دو بدو، با کمیت برابر و در جهات متقابل مشاهده میشوند. این نیروهای دوتائی را معمولاً عمل و عکس العمل مینامند.

نیروهای «یکتائی» در طبیعت وجود ندارند. آنچه که واقعاً وجود دارد، فقط تأثیرات متقابل بین اجسام است. ضمناً نیروهای عمل و عکس العمل همیشه برابراند و نسبت بهم حکم شیئ و تصویرش در آئینه را دارند.

نباید نیروهای متوازن را با نیروهای عمل و عکس العمل اشتباه کرد.

نیروهائی را متوازن میگویند که به یک جسم وارد می‌آیند. مثلاً وزن کتابی که روی میز قرار دارد (تأثیر زمین روی کتاب) با عکس‌العمل میز (تأثیر میز روی کتاب) متوازن است.

بر خلاف نیروهائی که در نتیجه توازن دو تاثیر متقابل بوجود می‌آیند، نیروهای عمل و عکس‌العمل بیانگر یک تأثیر متقابل‌اند، مثلاً تأثیر متقابل میز و کتاب بر یکدیگر. «میز — کتاب» — عمل است و «کتاب — میز» — عکس‌العمل. ملاحظه میشود که این نیروها به اجسام مختلف وارد آمده‌اند.

در اینجا گه نظایر چنین سئوالی پیش می‌آید، که تا اندازه‌ای گمراه کننده است: «اسب ارابه را میکشد. ارابه هم اسب را میکشد.

پس چطور میشود که آنها حرکت میکنند؟» ما سعی میکنیم این گمراهی را برطرف کنیم. قبل از هر چیز یادآور میشویم که اگر جاده لغزنده باشد، اسب ارابه را نخواهد کشید. پس برای توضیح علت حرکت باید نه فقط یک تأثیر متقابل «ارابه — اسب»، بلکه علاوه بر آن تأثیر متقابل دیگری — «اسب — جاده» را هم در نظر گرفت. حرکت وقتی آغاز میگردد که نیروی تأثیر متقابل اسب و جاده (نیروئی که اسب با آن از جاده کنده میشود) از نیروی تأثیر متقابل «اسب — ارابه» (نیروئی که با آن، ارابه اسب را میکشد) بیشتر شود. و اما در مورد نیروهای «ارابه اسب را میکشد» و «اسب ارابه را میکشد»، چون آنها بیانگر تأثیر متقابل واحدی هستند، بنا بر این، چه در حالت سکون و چه در هر لحظه حرکت یکسانند.

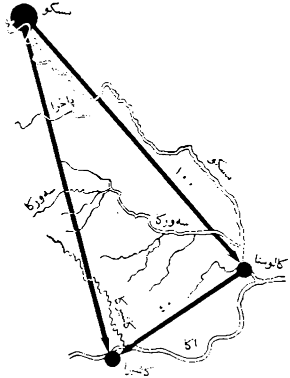
سرعتها را چگونه جمع میکنند

اگر من یکبار نیم ساعت و بار دیگر یکساعت انتظار کسی را کشیده باشم، میتوانم بگویم که مجموعاً یکساعت و نیم وقت تلف کرده‌ام. اگر یکبار به من یک روبل و بار دیگر دو روبل بدهند، در اینصورت من در مجموع سه روبل گرفته‌ام. اگر من یک بار نیم کیلو انگور بخرم و بعد یک کیلو، جمعا یک کیلو و نیم انگور خریده‌ام. در بارهٔ زمان، جرم و دیگر مقادیر نظیر آنها میگویند که اینها بصورت جبری جمع میشوند.

ولی همه مقادیر را نمیتوان باین سادگی جمع یا تفریق کرد. اگر من بگویم که از مسکو تا کالومنا ۱۰۰ کیلومتر است و از کالومنا تا کاشیرا ٤۰ کیلومتر، از اینجا چنین برنمی‌آید که کاشیرا در فاصله ١٤۰ کیلومتری از مسکو قرار دارد. فواصل و مسافات بصورت جبری جمع نمیشوند.

پس چطور میشود این مقادیر را باهم جمع کرد؟ در مثالی که در بالا آوردیم خیلی ساده میتوان راه حل لازم را پیدا کرد. سه نقطه نمایشگر طرز استقرار متقابل سه شهر مورد نظرمان را روی صفحه کاغذی میبریم (شکل ٤). از این سه نقطه یک مثلث میسازیم. با

معلوم بودن دو ضلع آن میتوان ضلع سوم را پیدا کرد. ولی برای این کار باید زاویه بین دو ضلع معلوم را دانست.



شکل ۴

مسافت نامعلوم را به این طریق بدست می‌آوریم که قطعه خط اولی را روی کاغذ میبریم و از انتهای آن، قطعه خط دومی را در جهت مفروض میسازیم. بعد، نقطهٔ شروع قطعه خط اولی را به انتهای قطعه خط دومی وصل میکنیم. خط حاصل مسافت مطلوب را مجسم میکند.

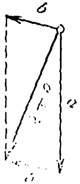
این طریقهٔ جمع را جمع هندسی و کمیت‌هائی را که باین طریق جمع میشوند، بردار مینامند.

برای تشخیص ابتدا و انتهای هر قطعه خط، آنرا با سهم مشخص میکنند. چنین قطعه خطی — که آنرا بردار مینامند — نمایشگر طول و جهت است.

در جمع چندین بردار نیز همین قاعده بکار برده میشود. با عبور از نقطه اولی به دومی، از دومی به سومی و الخ، ما راهی را می‌پیمائیم که آنرا میتوان با یک خط شکسته نشان داد. ولی ضمنا میتوان بخط مستقیم از نقطه مبدأ به همان نقطه نهائی رفت. این قطعه خط که

شکل چند ضلعی را متصل و مسدود میکند، حاصل جمع برداری است.

البته، مثلث برداری این را هم نشان میدهد که چگونه میتوان یک بردار را از بردار دیگر تفریق کرد. برای این کار، آن بردارها را از یک نقطه میگذرانند. برداری که از انتهای بردار دوم به انتهای اولی کشیده شود، حاصل تفریق بردارها خواهد بود.



شکل ٥

غیر از طریقه مثلث میتوان طریقه متوازی الاضلاع را (شکل ٥) که همانند آنست بکار برد. بدینمنظور از بردارهائی که باید باهم جمع شوند متوازی‌الاضلاعی میسازیم و از نقطه تقاطع بردارها قطر متوازی‌الاضلاع را میکشیم. از روی شکل بخوبی دیده میشود که قطر متوازی‌الاضلاع همان حاصل جمع بردارها است که با طریقه مثلث بدست آمده بود. یعنی هر دو طریقه را میتوان بطرز یکسانی بکار برد.

مورد استعمال بردارها تنها محدود به تعیین مسافات و تغییر مکانها نیست. در فیزیک به کمیتهای برداری خیلی زیاد برخورد میشود. مثلا سرعت حرکت را در نظر بگیریم. سرعت عبارتست از تغییر مکان در واحد زمان. از آنجا که تغییر مکان بردار است، سرعت نیز برداری در همان جهت است. در حرکت منحنی‌الخط سمت حرکت پیوسته در تغییر است. پس چگونه میتوان سمت سرعت را تعیین کرد میدانیم که قطعه کوچکی از خط منحنی همیشه در جهت خط مماس بر منحنی است. بنا بر این تغییر مکان جسم و سرعت آن در هر لحظه معین در سمت مماس بر خط حرکت میباشند.

جمع و تفریق سرعتها بطریقه برداری در موارد زیادی لازم میشو

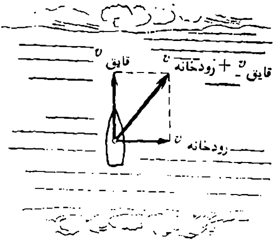
ضرورت جمع کردن سرعتها در مواردی پدید میآید که جسم در آن واحد در دو حرکت اشتراک میکند. این موارد کم نیستند. مثلا شخصی که در قطار راه‌آهن راه میرود، و در عین حال با قطار حرکت میکند. قطره آبی که از شیشه پنجره واگن فرو میریزد، در نتیجه وزن خود بپائین میافتد و در عین حال همراه قطار پیش میرود. کره زمین بدور خورشید میچرخد و در عین حال همراه خورشید نسبت به دیگر ستارگان حرکتی انجام میدهد. در کلیه این موارد و موارد نظیر، سرعتها بر طبق قاعده جمع بردارها باهم جمع میشوند.

موقعی که دو حرکت در طول یک خط انجام گیرد، اگر هر دو آنها در یک سمت باشند، جمع بردارها یک جمع عادی خواهد بود، و اگر حرکات در جهات عکس هم باشند، بردارها از هم تفریق میشوند.

ولی اگر جهات دو حرکت باهم زاویه‌ای تشکیل دهند، در این صورت باید طریقه جمع هندسی را بکار برد.

اگر هنگام گذار با قایق از ساحل رودخانه با جریان سریع‌السیری به ساحل دیگر، همواره در عرض رودخانه حرکت کنید، جریان آب شما را در جهت جریان بپائین خواهد برد. چون قایق در عین حال در دو جهت حرکت میکند: در عرض رودخانه و در طول آن. سرعت منتجه قایق در شکل ۶ نشان داده شده است.

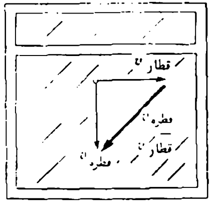
یک مثال دیگر. از پنجره قطار راه‌آهن حرکت قطرات باران چطور دیده میشود؟ لابد شما از پنجره‌های واگن به ریزش باران نگاه کرده‌اید. حتی در هوای آرام و بدون باد هم خطوط باران کج دیده میشوند،



شکل ۶

مثل اینکه بادی از مقابل قطار میوزد و آنها را کج میکند (شکل ۷).

اگر هوا آرام و بی‌باد باشد، قطره باران در خط قائم پائین میافتد. ولی در مدتی که قطره در طول پنجره سقوط میکند، قطار مقداری راه می‌پیماید و از خط قائم سقوط دور میشود و باین جهت ریزش قطرات باران نه بصورت خطوط قائم، بلکه کج بنظر میرسد.



شکل ۷

اگر سرعت قطار v_1 و سرعت سقوط قطره باران v_2 باشد، سرعت سقوط قطره نسبت به مسافر قطار از تفریق v_1 از v_2 بدست میآید*.

در شکل ۷ مثلث سرعتها نشان داده شده است که در آن، سمت بردار کج نمایشگر سمت باران میباشد. حالا برای ما روشن شد که چرا ما خطوط ریزش باران را کج می‌بینیم. طول بردار کج مقدار این سرعت را از روی مقیاس برگزیده ما بدست میدهد. هر چه سرعت حرکت قطار بیشتر و ریزش قطره باران کندتر باشد، خطوط باران بنظر ما کج‌تر می‌آیند.

نیرو بردار است

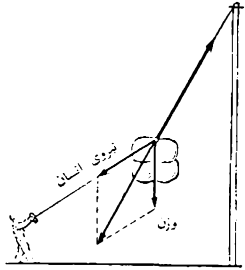
نیرو نیز همانند سرعت کمیت برداری است، چون همیشه در جهت معین عمل میکند. یعنی نیروها هم باید بر طبق همان قواعدی که ما از آن صحبت کردیم جمع و تفریق شوند.

ما غالباً در زندگی نمونه‌هائی را می‌بینیم که نمایشگر حاصل جمع برداری نیروها هستند. در شکل ۸ بسته باری به کابلی آویخته است. شخصی هم بار را با طناب بسوی خود میکشد. در نتیجه، کابل زیر

*در این اشکال و اشکال بعد ما بردارها را با خطوط درشت نشان میدهیم، و این بیانگر آنست که خطوط مزبور نه فقط واجد مشخصه کمیت، بلکه دارای جهت هم میباشند.

تأثیر دو نیرو قرار میگیرد: نیروی ثقل (وزن) بار و نیروی کشش آن شخص.

از روی قاعده جمع برداری نیروها ما میتوانیم [illegible] کابل را تعیین و نیروی کشش آنرا حساب کنیم. بسته بار در حالت سکون قرار دارد، پس مجموع نیروهای وارد بر آن باید برابر صفر باشد. و یا اینکه: کشش کابل باید با مجموع نیروی ثقل بار و نیروی کشش جنبی که توسط آن



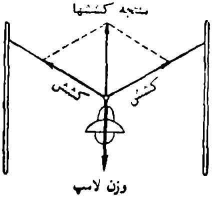
شکل ۸

برشخص وارد میشود برابر باشد. مجموع این نیروها قطر متوازی‌الاضلاع است که در همان امتداد کابل خواهد بود (چون در غیر اینصورت با نیروی کشش کابل خنثی نخواهد شد). درازای این بردار باید نیروی کشش کابل را نشان دهد. با این نیرو میتوان دو نیروئی را که به بسته بار وارد میآیند تعویض کرد. بنا بر این مجموع برداری نیروها را منتجه نیز مینامند.

غالب اوقات موردی عکس مورد جمع کردن نیروها پیش میآید. مثلا در مورد لامپی که به دو سیم آویخته است، برای تعیین نیروهای کشش هر یک از سیمها باید وزن لامپ را در این دو جهت تقسیم کنیم.

از انتهای بردار منتجه (شکل ۹) خطوطی موازی با سیمها میکشیم تا سیمها را قطع کنند. با این ترتیب متوازی‌الاضلاع نیروها ساخته شده است. با اندازه‌گیری طول اضلاع متوازی‌الاضلاع (با همان مقیاسی که وزن لامپ را رسم کرده‌ایم) مقادیر کشش سیمها معلوم میشود.

این عمل را تجزیه نیرو مینامند. همانطور که هر عددی را میتوان بگونه‌های بی‌پایان بصورت مجموع دو یا چند عدد نوشت، همانطور هم میتوان در مورد بردار نیرو عمل کرد، بدینطریق که هر نیروئی را میتوان به دو نیرو — همان اضلاع متوازی‌الاضلاع که در بالا



شکل ۹

گفته شد – تجزیه کرد، بطوریکه یکی از آنها را میتوان به هر اندازه دلخواه برگزید. این هم روشن است که روی هر برداری میتوان هر گونه کثیرالاضلاع ساخت.

غالباً مناسبتر است که نیرو روی دو امتداد عمود برهم تجزیه شود که یکی از آنها در جهت مطلوب باشد و دیگری در جهت عمود بر آن. آنها را مؤلفه‌های طولی و قائم (عمودی) مینامند.

مؤلفه نیرو در امتداد معین را که از تجزیه آن روی اضلاع متوازی‌الاضلاع بدست آمده است، ضمنا تصویر نیرو بر آن امتداد نیز مینامند.

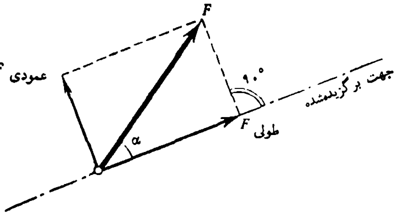
واضح است که در شکل ۱۰

$$F^2 = F^2_{\text{طولی}} + F^2_{\text{قائم}}$$

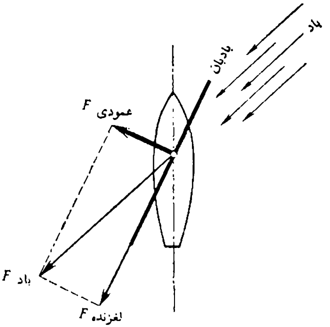
که در آن طولی F و قائم F تصاویر نیرو بر امتداد منتخب امتداد عمود بر آن است.

با دانستن روابط مثلثاتی به آسانی معلوم میشود که

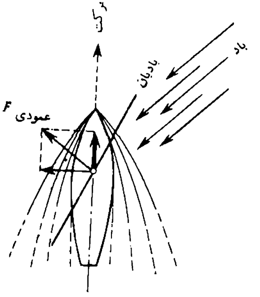
$$F_{\text{طولی}} = F \times \cos\alpha$$



شکل ۱۰



آ



ب

۱۱

که در آن α زاویه بین بردار نیرو و امتداد خطی است که نیرو بر آن تصویر شده است.

نمونه بسیار جالب تجزیه نیروها را میتوان در حرکت کشتی بادبانی نشان داد. چگونه میتوان با کشتی بادبانی در خلاف جهت باد حرکت کرد؟ اگر شما در چنین حالتی قایق بادبانی را مشاهده کرده باشید، لابد متوجه شده‌اید که قایق بطور زیگزاگ حرکت میکند.

البته با قایق بادبانی نمیتوان مستقیما در خلاف جهت باد حرکت کرد، ولی چرا تحت زاویه‌ای نسبت به جهت باد میشود پیش رفت؟

امکان مانور کردن علیه باد مبتنی بر دو پایه است. اول اینکه باد همیشه بادبان را تحت زاویه عمود بر سطح آن میراند. به شکل ۱۱ الف توجه کنید: نیروی باد به دو مؤلفه تجزیه شده است — یکی از آنها هوا را در طول بادبان میلغزاند، و دیگری — مؤلفه قائم به بادبان فشار وارد می‌آورد. دوم اینکه قایق نه در جهتی که باد آنرا میراند، بلکه در سمتی حرکت میکند که نوک قایق رو به آن قرار دارد.

و این بدانجهت است که حرکت قایق در جهت محور عرضیش با مقاومت بسیار شدید آب مواجه میشود. ضمناً برای اینکه با نوک خود به پیش حرکت کند، باید نیروی فشار روی بادبان، مؤلفه‌ای در امتداد محور طولی قایق، بسوی جلو داشته باشد.

با توضیح بالا، حالا دیگر شکل ب ۱۱ که در آن، حرکت قایقی در خلاف جهت باد تصویر شده است، باید برای شما مفهوم باشد. بادبان را طوری قرار میدهند که سطح آن منصف زاویه بین سمت حرکت قایق و سمت باد باشد.

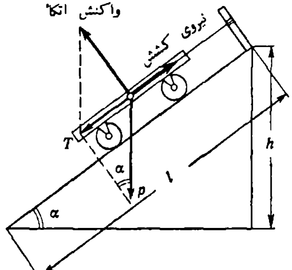
برای یافتن نیروئی که قایق را به پیش میراند، باید نیروی باد را دو بار تجزیه کرد. ابتدا در امتداد سطح بادبان و امتداد عمود بر آن — در اینجا برای ما مؤلفه قائم مهم است — و بعد این مؤلفه قائم را باید در امتداد محور طولی قایق و خط عمود بر آن تجزیه نمود. مؤلفه طولی که به این طریق بدست میآید، همان نیروئی است که قایق را با زاویه‌ای نسبت به سمت باد به پیش میراند.

بالا رفتن از شیب تند دشوارتر از حرکت در سطح کم نشیب است. اگر جسمی را در سطح شیبدار به ارتفاع معینی بالا ببریم آسانتر از اینست که آن جسم را به همان ارتفاع بطور قائم بلند کنیم. چرا اینطور است و چقدر آسانتر است؟ پاسخ این پرسشها را میتوانیم در قانون جمع نیروها بیابیم.

در شکل ۱۲ ما ارابه‌ای را می‌بینیم که بوسیله طنابی که به پایه‌ای محکم بسته شده، روی سطح شیبداری نگهداشته شده است. در این حالت، علاوه بر نیروی کشش دو نیروی دیگر نیز روی ارابه تأثیر میکنند- یکی از آنها وزن ارابه است و دیگری نیروی واکنش سطح اتکاء است که پیوسته در جهت عمود بر سطح عمل میکند، خواه سطح اتکاء افقی باشد، یا شیبدار.

بطوریکه گفته شد، هر گاه جسمی به سطح اتکائی فشار بیاورد، سطح اتکاء در برابر فشار وارده عکس‌العمل میکند و به اصطلاح نیروی واکنش بوجود میاورد.

برای ما این نکته جالبست که کشیدن ارابه به بالا در سطح شیبدار چقدر آسانتر از بالا کشیدن آن بطور قائم است.



شکل ۱۲

نیرو را چنان تجزیه میکنیم که یکی از مولفه‌ها در طول سطحی که جسم روی آن حرکت میکند باشد و مولفه دیگر عمود بر آن. برای اینکه جسم در سطح شیبدار در حالت سکون قرار گیرد، نیروی کشش طناب باید فقط با مؤلفه طولی متعادل باشد. مؤلفه دیگر با واکنش سطح اتکاٌ متعادل میشود.

نیروی کشش طناب T را میتوان یا از راه ترسیم هندسی و یا با محاسبه مثلثاتی بدست آورد. راه هندسی عبارت از اینست که از انتهای بردار وزن P خطی عمود بر سطح وارد کنیم. در شکل دو مثلث متشابه دیده میشود. نسبت بین طول سطح شیبدار l و ارتفاع h برابر است با نسبت بین اضلاع مربوط در مثلث نیروها. یعنی

$$\frac{T}{P}=\frac{h}{l}$$

از این فرمول چنین برمیآید که هر اندازه شیب سطح شیبدار کمتر ($\frac{h}{l}$ کوچکتر) باشد، جسم‌را آسانتر میتوان به بالا کشید.

و حالا راه دیگر برای کسانی که با مثلثات آشنائی دارند: چون زاویه بین مؤلفه قائم وزن و بردار وزن برابر زاویه α یعنی شیب سطح میباشد (دو زاویه‌ای که اضلاعشان متقابلا بهم عموداند)، پس

$$\frac{T}{P}=\sin\alpha$$

و از آنجا

$$T=P\times\sin\alpha$$

باین ترتیب معلوم میشود که کشیدن ارابه‌ای به بالا در سطح شیبدار با زویه شیب α، همیشه آسانتر از بالا کشیدن قائم آنست، چون در سطح شیبدار نیروی کشش همیشه کمتر از وزن جسم است ($\sin\alpha$ همیشه مقداریست کمتر از ۱).

بی‌مناسبت نیست که اهمیت این فرمول مثلثاتی را برای زوایای شیب ۳۰ و ۴۵ و ۶۰ درجه خاطرنشان سازیم. با دانستن اینکه

2—1300

$\sin 30° = \frac{1}{2}$، $\sin 45° = \frac{\sqrt{2}}{2}$ و $\sin 60° = \frac{\sqrt{3}}{2}$، میتوان از فایده‌ای که از لحاظ سهولت حرکت جسم در سطح شیبدار حاصل میشود، تصوری بدست آورد.

از فرمول بالا معلوم میشود که در سطح شیبداری با زاویه شیب ۳۰° نیروئی که ما باید برای کشیدن ارابه در سربالائی مصرف کنیم برابر نصف وزن ارابه است : $T = P \times \frac{1}{2}$. و در زوایای شیب ۴۵° و ۶۰° باید طناب را با نیروهائی برابر تقریباً ۰,۷ و ۰,۹ وزن ارابه کشید. مشاهده میشود که این شیبهای تند در کار کشش چندان سهولتی فراهم نمیکنند.

قوانین حرکت

دیدگاههای مختلف در باره حرکت

چمدانی در یکی از کوپه‌های واگن قرار دارد، و در عین حال همراه قطار حرکت میکند. خانه‌ای روی زمین ثابت و بی‌حرکت است، ولی با کره زمین حرکت میکند. در مورد یک جسم معین، در عین حال میتوان گفت: روی خط مستقیم حرکت میکند، ساکن است، میچرخد. و همه‌ی این قضاوتها صحیح‌اند — ، منتها از دیدگاههای مختلف.

نه فقط منظره‌ی حرکت متفاوتست، خواص حرکت نیز، اگر از دیدگاههای مختلف به آن نگه شود، متفاوتست.

تصور یک کشتی را بکنید که در معرض تأثیر امواج شدید دریای متلاطم قرار گرفته باشد. نظم درون کشتی برهم میخورد و اشیاء جابجا میشوند. زیرسیگاری از روی میز واژگون میگردد و بشدت زیر تختخواب پرتاب میشود. آب توی تنگ بحرکت در می‌آید و لبریز میشود. لامپ چراغ برق که از سقف آویزان است، همچو آونگ شروع به نوسان میکند. بعضی اشیاء بدون هیچ دلیل مشهودی به حرکت درمیآیند و برخی دیگر متوقف میشوند. از نقطه نظر ناظری که در این کشتی قرار دارد، قانون اصلی حرکت عبارت از آنست که هر جسم اگر به بدنه کشتی محکم نشده باشد، میتواند در هر لحظه به هر سمتی با سرعتهای مختلف به حرکت درآید.

این مثال نشان میدهد که در میان دیدگاههای گوناگون در باره‌ی حرکت، دیدگاههای بکلی نادرست وجود دارد.

ببینیم، چه دیدگاهی از همه «معقول» تر است؟

اگر شما ناگهان ببینید که چراغ روی میزتان بدون هیچ علتی خم شده، یا اینکه خشک‌کن از جایش پریده است، لابد ابتدا فکر میکنید که به نظرتان چنین رسیده است. ولی اگر این عمل تکرار شود، شما بدون شک و با کنجکاوی دنبال علتی میگردید که این اجسام را از حالت سکون خارج کرده است.

بنا بر این طبیعتاً آن دیدگاهی را میتوان صحیح و معقول شمرد که بموجب آن اجسام ساکن اگر در معرض تأثیر نیروئی قرار نگیرند، از جایشان حرکت نخواهند کرد.

این دیدگاه کاملاً طبیعی بنظر میرسد: جسم وقتی در حال سکون است که مجموع نیروهائی که بر آن وارد می‌آید برابر صفر باشد. حرکت جسم از جایش مسلماً تحت تأثیر نیروئی صورت میگیرد.

دیدگاه مستلزم وجود شخص ناظر است. ولی برای ما خود شخص ناظر مهم نیست. مکانی که او در آن قرار گرفته مهم است. بنا بر این ما بجای «دیدگاه در باره‌ی حرکت» خواهیم گفت: «سیستم محاسبه‌ای که حرکت در آن سیستم مورد بررسی قرار میگیرد»، و یا بطور ساده: سیستم محاسبه».

برای ما ساکنان روی زمین، سیستم مهم محاسبه عبارتست از کره‌ی زمین، ولی غالبا سیستم‌های محاسبه میتوانند اجسامی هم باشند که روی زمین حرکت میکنند، مثلاً کشتی، یا قطار راه‌آهن.

حالا برمیگردیم به آن «دیدگاه» در باره‌ی حرکت که ما آنرا صحیح نامیدیم. این سیستم محاسبه سیستم اینرسیال نامیده میشود. ما بعداً خواهیم دید که این اصطلاح از کجا گرفته شده است.

بنا بر این خواص سیستم اینرسیال محاسبه از اینقرار است: اجسامی که نسبت به این سیستم در حالت سکون قرار دارند، در معرض تأثیر هیچ نیروئی نیستند. این بدانمعنی است که در این سیستم هیچ حرکتی بدون تأثیر نیرو آغاز نمیگردد. سادگی و مناسب بودن این سیستم کاملا روشن است و بنا بر این میتوان آنرا بعنوان پایه پذیرفت.

تذکر این نکته بسیار مهم است که سیستم محاسبه مربوط به کره زمین با سیستم اینرسیال فرق چندانی ندارد. بنا بر این ما میتوانیم برای تحقیق و شناخت قانونمندیهای اساسی حرکت به بررسی آن قوانین از دیدگاه کره زمین بپردازیم. ولی باید در نظر داشت که همه آنچه

تردیدی نیست که سیستم اینرسیال محاسبه سیستمی مناسب و دارای مزایای بسیار ارزنده است.

ولی آیا این سیستم منحصر بفرد است، یا اینکه ممکنست بسیاری سیستمهای اینرسیال وجود داشته باشد؟ یونانیان قدیم معتقد بودند که سیستم اینرسیال یکتا است. در آثار آنها بسیاری تصورات ساده‌لوحانه در باره‌ی علل حرکت مشاهده میگردد. این تصورات در تعالیم ارسطو به حد کمال خود میرسد. بعقیده‌ی این فیلسوف، حالت طبیعی جسم سکون است، البته نسبت به کره‌ی زمین. هر گونه تغییر مکان جسم نسبت به زمین مسلماً دلیلی دارد — تأثیر نیروئی در میان است. و اگر دلایل حرکت وجود نداشته باشد، جسم باید متوقف شود، به حالت طبیعی‌اش باز گردد. این توقف همانا سکون جسم نسبت به کره‌ی زمین است، و کره‌ی زمین از این نقطه نظر یگانه سیستم اینرسیال است.

کشف حقیقت امر و رد این نظر نادرست، ولی خیلی نزدیک به پسیکولوژی ساده‌لوحانه را ما مدیون دانشمند بزرگ ایتالیائی گالیلئو گالیله، (۱۵۶٤ — ۱٦٤۲) هستیم.

بیائید روی تعریفی که ارسطو از حرکت داده است لحظه‌ای بیاندیشیم و در پدیده‌هائی که ما خوب آنها را میشناسیم، دلایلی در تایید و یا رد اندیشه سکون طبیعی اجسام واقع در روی کره‌ی زمین بیابیم.

فرض کنیم ما در هواپیمائی نشسته‌ایم که در سپیده دم فرودگاه را ترک میکند. خورشید هنوز هوا را گرم نکرده و از «چاههای هوائی» که برای بسیاری از مسافران سوانحی ببار می‌آورد، اثری نیست. حرکت هواپیما روان و نامحسوس است. اگر از شیشه هواپیما به خارج نگاه نکنیم، ابدا احساس نمیشود که هواپیما پرواز میکند. همه اشیاء درون هواپیما بی‌حرکتند. آیا این وضعیت با نظر ارسطو



گالیلئو گالیله (١٥٦٤ — ١٦٤٢) — فیزیکدان و ستاره‌شناس بزرگ ایتالیائی است که نخستین بار شیوه تجربی پژوهش را در علم بکار برد. گالیله مفهوم اینرسی را معمول داشت، نسبیت حرکت را ثابت کرد، قوانین سقوط اجسام و حرکت اجسام در سطح شیبدار و قوانین حرکت در صورت پرتاب جسم تحت زاویه معین نسبت به سطح افقی‌را مورد بررسی قرار داد و از آونگ برای اندازه‌گیری زمان استفاده کرد. گالیله برای نخستین بار در تاریخ بشریت لوله‌ی دوربینی را متوجه آسمان ساخت، بسیاری ستارگان نو کشف کرد، ثابت کرد که کهکشان از تعداد بسیار زیادی ستارگان تشکیل شده است، اقمار مشتری، لکه‌های خورشیدی و چرخش خورشید را کشف کرد و ساختار سطح کره ماه را مورد پژوهش قرار داد. گالیله سیستم هلیوسانتریک کوپرنیک را که در آن ایام از طرف کلیسای کاتولیک ممنوع شده بود، بشدت مورد پشتیبانی قرار میداد. پیگردهای متوالی از طرف انکیزیسیون ده سال آخر زندگی این دانشمند بزرگ را بر او تلخ کرد.

در باره‌ی حرکت جور می‌آید؟ البته خیر. چون، بنظر ارسطو حالت طبیعی جسم سکون آن نسبت به زمین است. پس در این صورت چرا همه اشیاء در قسمت عقب بدنه هواپیما گرد نیامدند، یعنی چرا سعی نکردند از حرکت هواپیما عقب بمانند و چرا «نخواستند» به حالت سکون «حقیقی» باز گردند؟ سیبی را که روی میز قرار گرفته و تماس خیلی مختصری با سطح میز دارد، چه عاملی وادار میکند که با سرعت خیلی زیاد — صدها کیلومتر در ساعت — حرکت کند؟

پس علل حرکت چیست؟ پاسخ صحیح به این پرسش کدامست؟ ابتدا ببینیم که بچه جهت اجسام متحرک متوقف میشوند؟ مثلاً گلوله مدوری که روی زمین میغلطد چرا از حرکت باز می‌ایستد؟ برای یافتن پاسخ صحیح این مسأله باید ببینیم که در چه مواردی گلوله زودتر متوقف میشود و در چه مواردی دیرتر؟ برای این کار به هیچ تجربه خاصی نیاز نیست. در تجربه‌ی زندگی این مسأله بر همه کس روشن است که هر اندازه سطحی که گلوله بر روی آن میغلطد صاف‌تر و صیقلی‌تر باشد، بهمان اندازه گلوله دورتر خواهد غلطید. از این تجربه و تجارب نظیر، در هر کس تصور طبیعی در باره‌ی نیروی اصطکاک بمثابه مانع حرکت و عامل ترمزکننده‌ی اجسامی که روی زمین میغلطند یا سر میخورند، بوجود میآید. به طرق مختلف میتوان از نیروی اصطکاک کاست. صافی و همواری راه، روغن‌کاری خوب، یاتاقانهای مکمل و اعلا باعث میشوند که جسم متحرک آزادانه بدون تأثیر هیچ نیرویی، هر چه ممکنست دورتر — برحسب اینکه ما تا چه اندازه بتوانیم عوامل مقاوم در برابر حرکت را از میان برداریم — راه بپیماید.

چنین سئوالی پیش میآید که اگر مقاومتی در مقابل حرکت نبود، اگر نیروی اصطکاک وجود نداشت، آنوقت چه میشد؟ در این صورت واضحست که حرکت بطور لایتناهی، با سرعت ثابت، در طول یک خط مستقیم ادامه مییافت.

با این ترتیب، ما قانون اینرسی را تقریبا به آن شکلی که نخستین بار توسط گالیله فرمولبندی شده بود بیان داشتیم. اینرسی بیان خلاصه قابلیت حرکت مستقیم‌الخط و یکنواخت جسم است... بدون هیچ علتی

(بر خلاف نظریه‌ی ارسطو). اینرسی خاصیت تفکیک‌ناپذیر هر ذره‌ای در کاینات است.

چگونه میتوان صحت این قانون جالب را مورد وارسی قرار داد؟ چون در واقع ایجاد چنان شرایطی که در آن شرایط هیچ نیروئی روی جسم متحرک تأثیر نکند، ممکن نیست. البته، این درست است. ولی ما میتوانیم حالت عکس آن را وارسی کنیم. در هر مورد که جسم تغییر سرعت میدهد، یا اینکه جهت حرکت آن تغییر میکند، همیشه میتوان علتی برای آن یافت — بعبارت دیگر، نیروئی را پیدا کرد که باعث این تغییر شده است. جسم بهنگام سقوط سرعت میگیرد. علت این امر تأثیر نیروی جاذبه زمین است. سنگی که به سر طنابی بسته شده است، بهنگام چرخش دایره‌ای ترسیم میکند. علت آن — علت انحراف سنگ از مسیر مستقیم الخط — نیروی کشش طناب است. اگر طناب پاره شود، سنگ در همان جهتی که در لحظه‌ی پاره شدن طناب حرکت میکرد پرتاب خواهد شد. اگر ضمن حرکت اتومبیل موتور آنرا خاموش کنید، اتومبیل به حرکت خود ادامه میدهد، ولی از سرعت آن کاسته میشود. علت امر — مقاومت هوا، اصطکاک چرخها با جاده و کامل نبودن ساختمان فنی یاتاقانها است.

قانون اینرسی بمنزله‌ی چنان پایه و بنیادیست که تمام آموزش مربوط به حرکت بر روی آن بنا میشود.

حرکت نسبی است

قانون اینرسی مارا به این نتیجه میرساند که سیستمهای اینرسیال متعدد اند.

حرکت «بدون علت» را نه یک سیستم، بلکه سیستمهای متعدد محاسبه نفی میکنند. اگر یکچنین سیستمی یافت شود، بلافاصله سیستم دیگری نیز پیدا خواهد شد که نسبت به سیستم اولی در حرکت انتقالی (بدون چرخش)، یکنواخت و مستقیم‌الخط است. ضمناً باید دانست که هیچیک از سیستمهای اینرسیال از دیگر سیستمها بهتر نیست هیچ مزیتی بر آنها ندارد. هرگز نمیتوان در میان سیستمهای

متعدد اینرسیال یکی را جدا کرد که از دیگر سیستمها بهتر باشد. قوانین حرکت اجسام در کلیه‌ی سیستمهای اینرسیال یکی هستند: اجسام فقط تحت تأثیر نیروها به حرکت در میآیند و تحت تأثیر نیروها ترمز میشوند، و در صورت فقدان تأثیر نیروها، یا بحال سکون در میآیند و یا بصورت یکنواخت در مسیر مستقیم‌الخط حرکت میکنند.

اینکه ممکن نیست یک سیستم اینرسیال را با هیچگونه تجاربی و از هیچ لحاظی از دیگر سیستمها متمایز دانست، ماهیت اصل نسبیت گالیله را که یکی از مهمترین قوانین فیزیک است، تشکیل میدهد.

ولی گرچه دیدگاههای ناظرانی که پدیده‌ها را در دو سیستم اینرسیال مورد بررسی قرار میدهند، کاملاً یکسانند، قضاوتهای آنها در باره‌ی یک واقعیت معین باهم تفاوت دارد. مثلاً برای ناظری که در قطار راه‌آهن در حال حرکت است، صندلی که او روی آن نشسته است، همیشه در مکان معینی از فضا قرار دارد، در صورتیکه برای ناظر دیگری که روی سکوی ایستگاه راه‌آهن ایستاده است، همان صندلی در حال حرکت و تغییر مکان از نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر است. یا اینکه مثلاً، ناظری که با تفنگ تیراندازی میکند میگوید که گلوله‌ی تفنگ او با سرعت ۵۰۰ متر در ثانیه روی خط سیرش حرکت میکند، در صورتیکه ناظر دیگری که در سیستمی قرار دارد که در همان جهت حرکت گلوله با سرعت ۲۰۰ متر در ثانیه در حرکت است، خواهد گفت که گلوله با سرعت ۳۰۰ متر در ثانیه حرکت میکند.

کدامیک از این دو ناظر درست میگویند؟ مسلماً هر دو. چون اصل نسبیت حرکت اجازه نمیدهد که برای یک سیستم اینرسیال ارجحیت قائل شویم.

از اینجا چنین برمیآید که در باره‌ی مکان در فضا و در باره سرعت حرکت نمیتوان قضاوتهای عامی که از هر نقطه نظر صحیح باشند، یا باصطلاح قضاوتهای مطلق کرد. مفاهیم مکان فضا و سرعت مفاهیمی نسبی هستند. بهنگام صحبت از این مفاهیم نسبی باید سیستم اینرسیال محاسبه مورد نظر قید گردد.

بدینسان فقدان یک دیدگاه «صحیح» در باره‌ی حرکت ما را به قبول نسبیت فضا میرساند. فضا را فقط در صورتی میشد مطلق نامید که میشد

جسمی را در آن در سکون مطلق یافت، یعنی سکونی از دیدگاه کلیه‌ی ناظران — چیزی که اصلاً ممکن نیست.

نسبیت فضا بدانمعنی است که فضا را نمیتوان بسان چیزی تصور کرد که اجسام به آن دوخته شده‌اند.

نسبیت فضا را علم آنقدر هم آسان و زود نپذیرفت. حتی دانشمند نابغه‌ای نظیر نیوتون فضا را مطلق می‌پنداشت، هر چند میدانست که این را بهیچوجه نمیشود اثبات کرد. تا اواخر سده‌ی نوزدهم این نظر نادرست در میان بسیاری از فیزیکدانان شایع بود. ظاهراً این امر علل روانشناسی دارد، باین معنی که مردم عادت کرده‌اند در اطراف خود «اماکن معین فضا» را بطور ثابت ببینند.

حالا ما باید ببینیم که چه مفاهیم مطلقی میتوان در باره‌ی خصلت حرکت یافت. اگر اجسامی نسبت به یک سیستم محاسبه با سرعتهای v_1 و v_2 حرکت میکنند، پس تفاوت آنها (البته، تفاوت برداری) $v_1 - v_2$ برای هر ناظر اینرسیال مقدار واحدی خواهد بود، چون هر دو سرعت v_1 و v_2 در صورت تغییر سیستم محاسبه به اندازه‌ی واحدی تغییر میکنند.

باین ترتیب ، تفاوت برداری سرعتهای دو جسم مطلق است. اگر اینطور باشد، پس بردار افزایش سرعت یک جسم معین در فاصله‌ی زمانی معین مطلق میباشد، یعنی مقدار آن نیز برای کلیه‌ی ناظران اینرسیال یکی است.

چرخش یک جسم نیز مثل تغییر سرعت آن دارای خصلت مطلق میباشد. جهت چرخش و تعداد دورها در دقیقه از دیدگاه کلیه‌ی سیستمهای اینرسیال یکی خواهد بود.

دیدگاه ناظر ستاره‌ای

ما تصمیم گرفتیم حرکت را از دیدگاه سیستمهای اینرسیال مورد پژوهش قرار دهیم. آیا در این صورت ما مجبور میشویم از ناظر زمینی دست بکشیم؟ زیرا بطوریکه کپرنیک ثابت کرده است، کره‌ی زمین بدور محورش و بدور خورشید میچرخد. شاید حالا برای خواننده‌ی این سطور مشکل باشد که جنبه‌ی انقلابی این کشف کپرنیک را

احساس کند و نیز تصور این واقعیت دشوار باشد که جوردانو برونو بخاطر دفاع از حقانیت افکار کپرنیک بمیان آتش رفت و گالیله مورد تحقیر قرار گرفت و تبعید شد.

اهمیت نبوغ کپرنیک در چیست؟ چرا کشف چرخش زمین را میتوان در ردیف اندیشه‌های حقانیت بشری که مردمان پیشرو حاضر بودند جان خود را در راه آن فدا کنند قرار داد؟

گالیله در اثرش «گفت و شنود پیرامون دو سیستم عمده‌ی جهان ـ سیستم‌های پتولومی و کپرنیک» که بخاطر نوشتن آن مورد پیگرد کلیسا قرار گرفت، مخالفان سیستم کپرنیک را سیمپلیچیو نامیده بود که بمعنای «عوام» و «ساده‌لوح» است.

واقعاً هم از نقطه‌ی نظر درک ساده و بلاواسطه‌ی جهان، که متاسفانه آنرا «درک سالم» مینامند، سیستم کپرنیک عجیب و یاوه بنظر میرسد. مردم عادی از خود میپرسند: «چطور میشود زمین بچرخد؟ ما که بچشم خود می‌بینیم که زمین ثابت و بیحرکت است، و این خورشید و ستارگانند که حرکت میکنند».

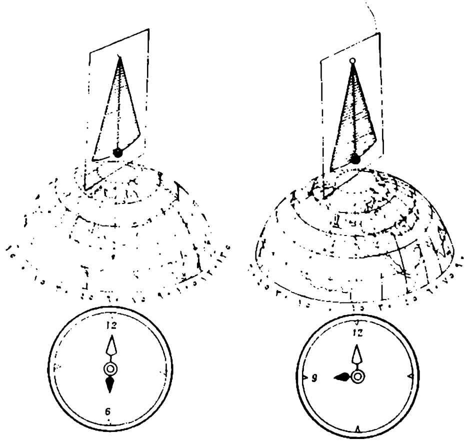
برخورد رجال دینی به کشف کپرنیک را میتوان از روی قرار مجمع الهیون (سال ۱۶۱۶) استنباط کرد:

«این فکر که خورشید در مرکز جهان قرار دارد و ثابت است، دروغ و بیمعنی است، فکریست ارتدادی و مغایر احکام مقدس شریعت، و این فکر که گویا زمین مرکز عالم نیست و حرکت میکند و بعلاوه گردش شبانه‌روزی دارد، از نظر فلسفی دروغ و بیمعنی و از لحاظ احکام شریعت لااقل اشتباه است».

این قرار که آمیخته ایست از عدم درک قوانین طبیعت و اعتقاد به صحت افکار جامد دینی با «درک سالم» نادرست، بهتر از هر چیز بیانگر نیروی روح و فکر کپرنیک و هواداران اوست که با چنان قاطعیتی به «حقایق مسلم» سده‌ی هفدهم پشت پا زدند.

حالا برگردیم به مساله‌ی مطروحه در بالا.

اگر سرعت حرکت ناظر تغییر کند و یا اگر ناظر بچرخد، در اینصورت او باید از شمار ناظران «صحیح» خارج شود. و بطوریکه میدانیم ناظران روی زمین در همین شرایط قرار دارند. ولی اگر تغییر سرعت یا چرخش ناظری در مدتی که او حرکتی را بررسی میکند زیاد



شکل ۱۳

نباشد، آن ناظر را میتوان بطور مشروط «صحیح» شمرد. آیا ناظری که در کره‌ی زمین قرار دارد میتواند مشمول این حالت باشد؟

در ظرف مدت یک ثانیه کره‌ی زمین $\frac{۱}{۲۴۰}$ درجه یا تقریباً ۰٫۰۰۰۰۷ رادیان میچرخد. مقدار چرخش چندان زیاد نیست. بنابر این در مورد بسیاری از پدیده‌ها، کره‌ی زمین را میتوان یک سیستم کاملاً اینرسیال دانست.

ولی در پدیده‌های درازمدت، دیگر نمیتوان چرخش زمین را از نظر دور داشت.

زیر گنبد کلیسای جامع ایساآکیفسکی در لنینگراد زمانی آونگ عظیم‌الجثه‌ای آویختند. اگر این آونگ را به نوسان درآوریم، بعد از مدت کوتاهی میتوانیم مشاهده کنیم که سطح نوسان آونگ بکندی میچرخد. چند ساعت که گذشت می‌بینیم که سطح نوسان به اندازه

زاویه چشمگیری چرخیده است. آزمایش با یکچنین آونگی را نخستین بار دانشمند فرانسوی فوکو انجام داد و بنابر این بنام او نامیده شده است. آزمایش فوکو چرخش زمین را بطور عینی به ما نشان میدهد (شکل ۱۳).

با این ترتیب اگر حرکت مورد مشاهده‌ی ما مدت درازی بخواهد بطول بیانجامد، در اینصورت ما ناگزیر باید از خیر ناظر زمینی بگذریم و سیستم محاسبه‌ای را مبنای کار بگیریم که با خورشید و ستارگان مربوط باشد. کپرنیک نیز که خورشید و ستارگان گرداگرد ما را ثابت و بیحرکت میشمرد، از چنین سیستمی استفاده میکرد.

در صورتیکه سیستم کپرنیک در واقع یک سیستم کملاً اینرسیال نبود.

کیهان از بسیاری مجموعه‌های انبوه و متراکم ستارگان ــ جزایر عالم کاینات که کهکشان نام دارند، تشکیل میشود. کهکشانی که منظومه‌ی خورشیدی ما جزو آنست دارای قریب یکصد میلیارد ستاره میباشد. خورشید با دوره‌تناوبی برابر ۱۸۰ میلیون سال و با سرعتی حدود ۲۵۰ کیلومتر در ثانیه گرد مرکز این کهکشان میچرخد.

اگر ما ناظر خورشیدی را اینرسیال فرض کنیم چه اشتباهی مرتکب شده‌ایم؟

برای مقایسه‌ی محسنات ناظران زمینی و خورشیدی ببینیم که سیستم خورشیدی محاسبه در مدت یک ثانیه تحت چه زاویه‌ای دوران میکند. در حالی که دور کامل در مدت ۱۸۰×۱۰^{۶} سال $(۱۰^{۱۵} \times ۲ \times ۱۰^{۱۵}$ ثانیه) صورت میگیرد، پس در یک ثانیه، سیستم خورشیدی محاسبه باندازه‌ی ۶×۱۰^{-۱۴} درجه یا تحت زاویه‌ی $۱۰^{-۱۵}$ رادیان دوران خواهد کرد. میتوان گفت که ناظر خورشیدی ۱۰۰ میلیارد بار از ناظر زمینی «بهتر» است.

دانشمندان ستاره‌شناس که میخواهند هر چه بیشتر به سیستم اینرسیال نزدیک شوند، سیستم محاسبه‌ای رابعنوان پایه میگیرند که با چند کهکشان مربوط باشد. چنین سیستم محاسبه‌ای اینرسیال‌ترین سیستم ممکن است. سیستمی بهتر از آن نمیشود پیدا کرد.

ستاره شناسان را به دو مفهوم میتوان ناظران ستاره‌ای نامید: آنان ستارگان را نظاره میکنند و حرکات خورشیدهای سماوی را از دیدگاه ستارگان شرح میدهند.

فیزیک برای بیان بی‌ثباتی سرعت از مفهوم شتاب استفاده میکند. تغییر سرعت در واحد زمان شتاب نامیده میشود. بجای اینکه گفته شود: «سرعت جسم در مدت ۱ ثانیه بقدر a تغییر کرده است»، با بیان کوتاه‌تری گفته میشود: «شتاب جسم برابر a است».

اگر ما سرعت حرکت مستقیم‌الخط در اولین لحظه زمان را با v_1 و سرعت در لحظه بعدی را با v_2 نشان دهیم، محاسبه‌ی شتاب a از روی این فرمول صورت میگیرد:

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t}$$

که در آن t زمانی است که طی آن مدت سرعت حرکت از v_1 به v_2 افزایش یافته است.

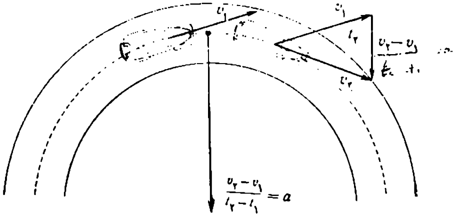
سرعت با سانتیمتر در ثانیه cm/s (یا متر در ثانیه m/s و غیره) اندازه‌گیری میشود و زمان ــ با ثانیه. از اینجا چنین برمیآید که شتاب با cm/s در ثانیه اندازه‌گیری میشود. یعنی شماره‌ی سانتیمترها در ثانیه باید تقسیم شود بر ثوانی. بنابر این واحد شتاب عبارت خواهد بود از cm/s^2 (یا m/s^2 و غیره).

بدیهیست که شتاب میتواند ضمن حرکت تغییر کند. ولی ما مساله را با این حالت غیر اصولی بغرنج نمیکنیم و با چشم‌پوشی از این حالت فرض میکنیم که سرعت بهنگام حرکت بطور یکنواخت افزایش مییابد. چنین حرکتی را حرکت یکنواخت شتابدار مینامند.

شتاب حرکت منحنی الخط عبارت از چیست؟

سرعت بردار است، تغییر (تفاوت) سرعت‌ها بردار است، بنابراین شتاب هم بردار است. برای بدست آوردن بردار شتاب باید تفاوت برداری سرعتها را بر زمان تقسیم کرد. ما قبلاً دیدیم که چگونه بردار تغییر سرعت را میسازند.

جاده می‌پیچد. اتومبیلی را در دو حالت نزدیک بهم و سرعتهای آنرا بصورت بردار در نظر بگیریم (شکل ۱۴). از تفریق بردارها ما کمیتی بکلی متفاوت از صفر بدست خواهیم آورد. با تقسیم آن به فاصله‌ی زمانی مقدار شتاب بدست خواهد آمد. بطوریکه مشاهده



شکل ۱۴

میشود حتی موقعی هم که کمیت سرعت بهنگام گردش تغییر نکرده، شتاب وجود داشته است. حرکت منحنی‌الخط همیشه شتابدار است. بی‌شتابی فقط و فقط مختص حرکت مستقیم‌الخط یکنواخت است

ضمن بحث از سرعت حرکت جسم، ما همیشه از دیدگاه حرکت صحبت میکردیم که دیدگاه نسبت به حرکت است. سرعت جسم نسبی است. این سرعت از نقطه نظر یک سیستم اینرسیال میتواند بزرگ باشد و از نقطه نظر سیستم اینرسیال دیگر — کوچک. آیا در مورد شتاب هم باید این نکته را در نظر بگیریم؟ خیر، بهیچوجه. شتاب بر خلاف سرعت مطلق است. شتاب از نقطه‌ی نظر هر سیستم اینرسیالی که بشود تصور کرد، مقدار ثابتی خواهد بود. چون شتاب مربوط است به اختلاف سرعتهای جسم در دو لحظه معین زمان، و این اختلاف بطوریکه میدانیم از کلیه‌ی دیدگاهها یکی میباشد یعنی مطلق است.

شتاب و نیرو

اگر جسم زیر تأثیر هیچ نیروئی قرار نگیرد، فقط میتواند حرکت بی‌شتاب داشته باشد. برعکس، تأثیر نیروئی بر جسم، باعث ایجاد شتاب میشود، و هر قدر نیرو بیشتر باشد، شتاب زیادتر است. ما هر چه زودتر بخواهیم ارابه‌ی سنگینی را بحرکت درآوردیم، باید عضلاتمان را بیشتر بکار بگیریم. روی جسم متحرک معمولاً دو نیرو تأثیر میکند:

۵۰

یکی نیروی فزایندهٔ سرعت که همان نیروی کشش است، و دیگری نیروی ترمزکننده که عبارتست از نیروی سایش و یا مقاومت هوا.
تفاوت این دو نیرو، یا باصطلاح نیروی منتجه، میتواند در جهت حرکت باشد و یا در خلاف آن. در حالت اول حرکت جسم سریع میشود و در حالت دوم کند میگردد. ولی اگر این دو نیرو که در جهات عکس همدیگر تأثیر میکنند باهم برابر (متعادل) باشند، جسم یکنواخت حرکت خواهد کرد، مثل حالتی که اصلاً نیروئی بر جسم وارد نیاید.
رابطهٔ بین نیرو و شتاب حاصله از آن چیست؟ پاسخ این پرسش خیلی ساده است. شتاب با نیرو نسبت مستقیم دارد:

$$a \backsim P$$

(علامت $\backsim$ بیانگر «نسبت مستقیم» است.)
ولی حل یک مساله باقی میماند و آن چگونگی تأثیر خواص جسم است روی قابلیت شتابگیری آن در حرکت، موقعیکه آن جسم زیر تأثیر نیروئی قرار میگیرد. چون این مساله روشن است که اجسام گوناگون تحت تأثیر نیروی واحد شتابهای گوناگون بخود میگیرند.
ما راه حل این مساله را میتوانیم از این حالت بسیار جالب بدست آوریم که کلیهٔ اجسام با شتاب واحدی به زمین سقوط میکنند. این شتاب را با حرف g نمایش میدهند. در بخش مسکو شتاب $g = ۹۸۱\ cm/s^۲$.
این وحدت شتاب سقوط آزاد با مشاهدهٔ مستقیم و در اولین نظر به چشم نمی‌آید. چون بهنگام سقوط اجسام در شرایط معمولی، غیر از نیروی جاذبه نیروی «ممانعت‌کننده» ای نیز روی آنها تأثیر میکند که عبارتست از مقاومت هوا. تفاوت طرز سقوط اجسام سبک و سنگین همیشه فلاسفهٔ قدیم را به اشتباه می‌انداخت. یک قطعه آهن بسرعت سقوط میکند، در حالیکه مثلاً پرسرغ در هوا به جولان در می‌آید و آرام آرام بر زمین می‌نشیند. برگ کاغذ تا نخورده نیز بکندی فرود می‌آید. در صورتیکه اگر همان کاغذ را در مشتمان مچاله کنیم با سرعت بیشتری سقوط خواهد کرد. یونانیان قدیم میفهمیدند که هوا منظرهٔ «واقعی» حرکت جسم در اثر جاذبهٔ زمین را تحریف میکند و آنرا دگرگونه به ما نشان میدهد. ولی دمکریت چنین فکر میکرد

که حتی اگر تأثیر هوا را هم حذف کنند، معذلک اجسام سنگین همیشه سریعتر از اجسام سبک سقوط خواهند کرد. ضمناً مقاومت هوا ممکنست تأثیر عکس هم ببخشد. مثلاً اگر یک ورقهی نازک آلومینیوم (ورقهی گستردهی پهنی) را از بالا رها کنیم، خیلی کندتر از مثلاً گلولهی مچالهشدهی قطعهای از همان ورقه فرود خواهد آمد.

باید دانست که اکنون سیمهای فلزی خیلی نازکی (به ضخامت چند میکرون) درست میکنند که مثل پرمرغ در هوا به پرواز درمیآیند.

ارسطو معتقد بود که در خلاء کلیهی اجسام باید بطرز یکسانی سقوط کنند. ولی او از این استنباط معقول نتیجهگیری عجیبی میکرد و میگفت: «همانقدر که عدم امکان وجود خلاء واضح و روشن است، سقوط اجسام مختلف با سرعت واحد بیمعنی است».

هیچیک از دانشمندان سدههای قدیم و میانه به این فکر نیفتاد که این مساله را در عمل مورد وارسی قرار دهد که آیا اجسام با شتابهای گوناگون به زمین سقوط میکنند، یا با شتاب واحد. فقط گالیله بود که با تجربیات ارزندهاش (او حرکت گویها را در سطح شیبدار و سقوط اجسام را با پرتاب آنها از بالای برج شیبدار پیزا مورد بررسی قرار میداد) نشان داد که کلیه اجسام، صرفنظر از جرمشان، در یک نقطه معین از کره زمین با شتاب واحد سقوط میکنند. در حال حاضر این آزمایشها را میتوان خیلی ساده، بوسیله لوله درازی که هوای درون آنرا بیرون کشیدهاند، انجام داد. درون چنین لولهای پرمرغ و سنگ کاملاً یکسان سقوط میکنند. چون در این حالت فقط یک نیرو روی اجسام تأثیر میکند و آن وزن است. مقاومت هوا به صفر میرسد. و در صورتیکه مقاومت هوا وجود نداشته باشد، سقوط کلیه اجسام بصورت حرکت یکنواخت شتابدار صورت میگیرد.

حالا به مساله مطروحه بالا برمیگردیم. چه رابطهای بین قابلیت شتابگیری جسم زیر تأثیر نیروی معین و خواص آن جسم وجود دارد؟

قانون گالیله میگوید که کلیه اجسام صرفنظر از جرمشان با شتاب واحدی سقوط میکنند. یعنی جرم m kg زیر تأثیر نیروئی برابر m kgf با شتاب g حرکت خواهد کرد.

حال فرض کنیم که اصولاً صحبت ما بر سر سقوط اجسام نیست و

3—1300



ایساآک نیوتن (۱۶۴۳ — ۱۷۲۷) — فیزیکدان و ریاضیدان نابغه‌ی انگلیسی و یکی از بزرگترین دانشمندان تاریخ بشر است. نیوتن مفاهیم و قوانین اساسی مکانیک را فرمولبندی کرده، قانون جاذبه‌ی عمومی را کشف نمود و باین ترتیب منظره‌ی فیزیکی از جهان بوجود آورد که تا آغاز قرن بیستم دست نخورده باقی ماند. نیوتن تئوری حرکت اجرام سماوی را تنظیم کرد، ویژگیهای بسیار مهم حرکت کره‌ی ماه‌را معلوم ساخت و علت پیدایش جزر و مدها را توضیح داد. نیوتن در رشته‌ی اپتیک اکتشافات درخشانی دارد که به پیشرفت سریع این مبحث علم فیزیک کمک کرده است. نیوتن شیوه‌ی پرتوان پژوهش طبیعت بکمک علم ریاضیات را بکار برد. افتخار ایجاد محاسبات دیفرانسیل و انتگرال به او تعلق دارد. این موفقیت در تمام پیشرفتهای بعدی علم فیزیک تأثیراتی بس عمیق بخشید و به استفاده از شیوه‌های ریاضی پژوهش در فیزیک کمک کرد.

به جرم m kg نیروئی برابر kgf ۱ وارد میآید. چون شتاب با نیرو نسبت مستقیم دارد، بنابراین m بار کمتر از g خواهد بود.

ما به این نتیجه رسیدیم که شتابی که جسم a زیر تأثیر نیروی معین (در مثال ما kgf ۱) بخود میگیرد با جرم آن نسبت معکوس دارد.

از این دو نتیجه‌گیری ما میتوانیم بنویسیم که

$$a \propto \frac{F}{m}$$

یعنی اگر جرم ثابت باشد، شتاب با نیرو نسبت مستقیم دارد، و اگر نیرو ثابت باشد، شتاب با جرم نسبت معکوس خواهد داشت.

قانونی که رابطه‌ی شتاب را با جرم جسم و نیروی وارد بر آن معین میکند، توسط دانشمند بزرگ انگلیسی ایساآک نیوتن (۱۶٤۳ — ۱۷۲۸) کشف شده و نام وی را نیز بر خود دارد *

شتاب با نیروی وارد بر جسم متناسب است و با جرم جسم نسبت معکوس دارد و غیر از اینها به هیچیک از دیگر خواص جسم وابسته نیست. از قانون نیوتن چنین برمیآید که همانا جرم معیار «عطالت» جسم است. زیر تأثیر نیروی واحد هر قدر جرم جسم بیشتر باشد، شتابگیری آن دشوارتر است. باین ترتیب، جرم که تا کنون ما آنرا بصورت کمیت «ساده» ای میشناختیم که در ترازوی شاهین دار توزین میشود، مفهوم ژرف تازه‌ای کسب میکند، یعنی بیانگر خواص دینامیک جسم میشود.

قانون نیوتن را میتوان به این صورت نوشت:

$$kF = ma$$

که در آن k ضریب ثابت است و به واحدهائی که ما برگزیده‌ایم بستگی دارد.

---

* خود نیوتن حرکت را تابع سه قانون میدانست و قانونی را که در اینجا مورد بحث ما است در ردیف دوم ذکر میکرد. در ردیف اول او قانون اینرسی و در ردیف سوم قانون عمل و عکس‌العمل را نام برده است.

بجای استفاده از واحد نیرو kgf ما شیوه‌ای را بکار میبریم که دانشمندان فیزیک غالباً مورد استفاده قرار میدهند، یعنی واحد نیرو را چنان میگیریم که ضریب تناسب در قانون برابر یک باشد. در این صورت قانون نیوتن به این شکل درمیآید:

$$F = ma$$

بطوریکه گفتیم، در فیزیک قرار بر این گذاشته شده است که جرم را با گرم، درازا را با سانتیمتر و زمان را با ثانیه اندازه‌گیری کنند. سیستم واحدهای مبتنی بر این سه کمیت اساسی را سیستم CGS مینامند.

حالا واحد نیرو را با استفاده از اصلی که در بالا ذکر کردیم انتخاب میکنیم. واضح است که نیرو وقتی برابر یک خواهد بود که به جرم یک گرم شتابی برابر ۱ cm/s^2 بدهد، چنین نیروئی را در این سیستم دین نامیده‌اند.

بموجب قانون نیوتن $F=ma$ است. اگر m برحسب گرم در a برحسب سانتیمتر در مجذور ثانیه ضرب شود، نیرو برحسب دین بدست میآید. بنابر این میتوان چنین نوشت:

$$۱ \text{ دین} = \frac{g \times cm}{s^2}$$

وزن جسم معمولاً با حرف P نمایش داده میشود. نیروی P به جسم شتاب g را میدهد و بنابر این

$$P_{\text{دین}} = mg$$

ضمناً ما تا کنون گیلوگرم (kgf) را بعنوان واحد نیرو میشناختیم. رابطه بین این دو واحد قدیم و جدید را میتوان بلافاصله از فرمول اخیر بدست آورد:

دین ۹۸۱۰۰۰ = ۱ گیلوگرم (وزن)

دین واحد خیلی کوچک نیرو و تقریباً برابر یک میلی‌گرم وزن است.

ما از سیستم جدید واحدها (SI) که اخیراً تعیین گشته است صحبت کردیم. نامگذاری نیوتن (n) بعنوان واحد نیرو انتخابی کاملاً شایسته است. با انتخاب این واحد، فرمول قانون نیوتن خیلی ساده خواهد شد و آنرا میتوان به این صورت نوشت:

$$۱ \text{ نیوتن} = ۱ \frac{kg \times m}{s^۲}$$

یعنی ۱ نیوتن نیروئی است که به جرم ۱ کیلوگرم شتاب $۱ \ m/s^۲$ میدهد. به آسانی میتوان رابطه بین این واحد جدید را با دین و کیلوگرم تعیین کرد:

$$۱ \text{ نیوتن} = ۱۰۰۰۰۰ \text{ دین} = \frac{۱}{۹,۸} kgf$$

حرکت مستقیم با شتاب ثابت

این حرکت بموجب قانون نیوتن پدید میآید، یعنی موقعی که به جسم در مجموع نیروئی ثابت، تسریع‌کننده‌ی جسم یا ترمزکننده‌ی آن، تأثیر میکند.

این شرایط غالباً — ولو نه با دقت کامل — پدید می‌آیند: اتوبیلی که با موتور خاموش حرکت میکند زیر تأثیر نیروی سایشی که تقریباً دائمی است ترمز میشود و شئی وزین زیر تأثیر نیروی ثابت جاذبه از بالا به پائین سقوط میکند.

با دانستن مقدار نیروی منتجه و همچنین جرم جسم ما میتوانیم از روی فرمول $a = \frac{F}{m}$ مقدار شتاب را پیدا کنیم. چون

$$a = \frac{v - v_۰}{t}$$

که در آن t زمان حرکت، v سرعت نهائی و $v_۰$ سرعت ابتدائی است، بنابر این با کمک این فرمول میتوان به برخی از مسائل پاسخ داد، از جمله مثلاً به مسائلی از این قبیل: قطار راه‌آهن بعد از چه مدت زمانی متوقف خواهد شد، اگر نیروی ترمزکننده، جرم قطار و سرعت ابتدائی آن معلوم باشد؟ اتوبیل با چه سرعتی حرکت خواهد کرد، اگر توان موتور، نیروی مقاومت، جرم ماشین و زمان سرعتگیری معلوم باشد؟

غالباً ما میخواهیم بدانیم که جسم دارای حرکت یکنواخت

شتابدار چقدر راه پیموده است. اگر حرکت یکنواخت باشد، راه پیموده شده با ضرب کردن سرعت در زمان حرکت بدست میآید. و اگر حرکت یکنواخت شتابدار باشد، در این صورت مقدار راه پیموده شده همان خواهد بود که !گر جسم در همان زمان t بطور یکنواخت با سرعتی برابر نصف مجموع سرعتهای ابتدائی و نهائی حرکت میکرد، یعنی:

$$S = \frac{۱}{۲}(v_{\circ} + v)t$$

بدینسان در حرکت یکنواخت شتابدار (یا یکنواخت کندشونده) راه پیموده شده توسط جسم برابر است با حاصل ضرب نصف مجموع سرعتهای ابتدائی و نهائی در زمان حرکت. همین مقدار راه را در همان مدت زمان جسمی که با سرعت $\frac{۱}{۲}(v_{\circ} + v)$ حرکت یکنواخت انجام میدهد خواهد پیمود. از این لحاظ ما میتوانیم بگوئیم که $\frac{۱}{۲}(v_{\circ} + v)$ سرعت متوسط حرکت یکنواخت شتابدار است.

لازم است فرمولی را بدست بیاوریم که رابطه‌ی راه پیموده شده را با شتاب نشان دهد. اگر در فرمول آخری بجای v مقدار برابرش $v_{\circ} + at$ را قرار دهیم، رابطه‌ی زیر بدست میآید:

$$S = v_{\circ}t + \frac{at^{۲}}{۲}$$

و یا اگر حرکت بدون سرعت اولیه باشد، فرمول بالا به این صورت درمیآید:

$$S = \frac{at^{۲}}{۲}$$

اگر در مدت یک ثانیه جسم ۵ متر راه پیموده باشد، در دو ثانیه (۵ × ٤) متر، در سه ثانیه (۵ × ۹) متر و الخ خواهد پیمود. راه پیموده شده با مجذور زمان نسبت مستقیم دارد.

بموجب همین قانون هر جسم وزینی از بالا به پائین سقوط میکند. شتاب در سقوط آزاد برابر g است و بنابر این فرمول بالا، اگر t برحسب ثانیه باشد، باین صورت درمیآید:

$$S = \frac{۹۸۱}{۲} \times t^{۲}\ [\mathrm{cm}]$$

اگر جسم بتواند بلامانع مدت زیادی مثلاً ۱۰۰ ثانیه سقوط کند، راه پیموده‌شده از مبدأ سقوط خیلی زیاد ــ در حدود ۵۰ کیلومتر خواهد بود. ضمناً در ۱۰ ثانیه‌ی اول فقط $\frac{۱}{۲}$ کیلومتر طی خواهد شد.

از اینجا میتوان تصوری از حرکت شتابدار بدست آورد.

پس تغییرات سرعت جسم بهنگام سقوط از ارتفاع معین چگونه خواهد بود؟ برای پاسخ دادن به این پرسش ما فرمولهائی لازم داریم که رابطه‌ی راه پیموده‌شده با شتاب و سرعت را بدست دهند. اگر در فرمول $S = \frac{۱}{۲}(v_{۰} + v)t$ بجای t معادلش $t = \frac{v - v_{۰}}{a}$ را قرار دهیم خواهیم داشت:

$$S = \frac{۱}{۲a}(v^{۲} - v_{۰}^{۲})$$

و اگر سرعت ابتدائی برابر صفر باشد، در اینصورت

$$S = \frac{v^{۲}}{۲a}, \quad v = \sqrt{۲aS}$$

بلندی یک عمارت دو یا سه طبقه ده متر است. چرا پرش از بام چنین خانه‌ای روی زمین خطرناکست؟ یک محاسبه‌ی ساده نشان میدهد که سرعت سقوط آزاد بمیزان $v = \sqrt{۲ \times ۹{,}۸ \times ۱۰}\ \mathrm{m/s} = ۱۴\ \mathrm{m/s} \approx ۵۰\ \mathrm{km/h}$ خواهد رسید که برابر سرعت حرکت اتومبیلها در شهر است.

مقاومت هوا از این سرعت چندان نمی‌کاهد.

فرمولهای بالا را میتوان در هر گونه محاسباتی بکار برد. از جمله مثلا در بررسی چگونگی حرکت در کره‌ی ماه.

در رمان والاس «اولین انسانها در کره‌ی ماه» از حوادث غیر مترقبه‌ای که بر سر سیاحان کره‌ی ماه در سیاحت افسانه‌ایشان وارد میآید صحبت میشود. در کره‌ی ماه شتاب ثقل تقریباً ۶ بار کمتر از شتاب زمینی است. در کره‌ی زمین جسم در حال سقوط در ثانیه‌ی اول ۵ متر راه می‌پیماید، در حالیکه در کره‌ی ماه جسم مزبور در همان مدت فقط ۸۰ سانتیمتر بپائین «شناور میشود» (شتاب تقریباً برابر m/s^{2} ۱٫۶ است).

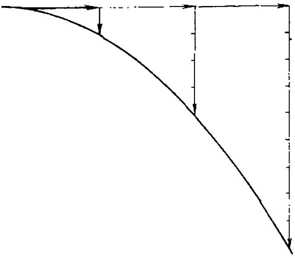
با فرمولهای بالا میتوان «عجایب» کره‌ی ماه را بسرعت محاسبه کرد. پرش از بلندی h بقدر $t=\sqrt{\frac{2h}{g}}$ طول میکشد. چون شتاب در کره‌ی ماه ۶ بار کمتر از شتاب روی زمین است، بنابراین پرش از بلندی معینی در کره‌ی ماه $\sqrt{6}=2{,}45$ بار بیشتر از پرش از همان‌بلندی در روی زمین طول میکشد. پس سرعت نهائی پرش $(v=\sqrt{2gh})$ چند بار کمتر است؟

در کره ماه میتوان از بلندی یک خانه‌ی سه‌طبقه بدون خطر بپائین پرید. ضمناً ارتفاع پرش با سرعت ابتدائی واحد (فرمول $h=\frac{v^{2}}{2g}$ در کره‌ی ماه شش بار از زمین بیشتر است. در کره‌ی ماه یک کودک میتواند رکورد زمینی پرش را بشکند.

راه گلوله

وظیفه‌ی پرتاب اشیاء به مسافات هر چه ممکنست دورتر از قدیم‌الایام در مقابل انسان قرار داشت. سنگی که با دست یا فلاخن پرتاب میگردد، تیری که از کمان رها میشود، گلوله‌ی تفنگ ، مرمی توپ، موشک بالیستیکی — اینها فهرست خلاصه‌ای از موفقیتهای بشر در این زمینه اند.

شیی پرتاب‌شده در خط سیر منحنی شکل که شلجمی نامیده میشود حرکت میکند. اگر حرکت جسم پرتاب‌شده را مجموع دو حرکت افقی و شاقولی که همزمان و مستقل از هم صورت میگیرند در نظر بگیریم،

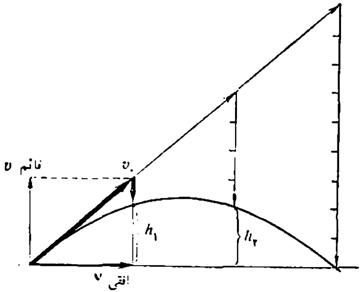


شکل ۱۵

امیتوانیم این خطسیر شلجمی را بدون هیچ اشکالی بسازیم. شتاب نیروی جاذبه شاقولی است، بنا براین گلولهی پرتابشده با اینرسی خود، با سرعتی ثابت، روی خط افقی حرکت میکند و در عین حال، روی خط شاقولی با شتابی ثابت بسوی زمین میافتد. چگونه این دو حرکت را باهم جمع میکنند؟

مساله را از حالت سادهی آن شروع میکنیم — فرض میکنیم سرعت ابتدائی افقی است (یعنی مثلا با تفنگ تیراندازی میشود که لوله آن افقی است).

روی یک برگ کاغذ میلیمتری خطوط شاقولی و افقی (شکل ۱۵) را رسم میکنیم. چون دو حرکت بطور مستقل صورت میگیرند، پس بعد از t ثانیه جسم روی قطعه خط $v.t$ براست و روی قطعه خط $\frac{gt^2}{2}$ بپائین تغییر مکان خواهد داد. روی خط افقی قطعهی $v.t$ را میبریم و از انتهای آن قطعهی شاقولی $\frac{gt^2}{2}$ را جدامیکنیم. انتهای این قطعه شاقولی نقطهایست که جسم بعد از t ثانیه در آن خواهد بود. این عمل را باید برای چند نقطه، یعنی برای چند لحظه زمانی انجام داد. از نقاط بدستآمده میتوان خط سنحنی عبور داد که شلجمیشکل است و نمایشگر خط سیر جسم میباشد. هر چه بیشتر از این نقاط بدست آید، ترسیم خط سیر گلوله دقیقتر خواهد بود.



شکل ۱۶

در شکل ۱۶ خطسیر برای موردی ترسیم شده است که سرعت اولیه v_0 با خط افقی زاویه‌ی معینی تشکیل میدهد.

ابتدا باید بردار v_0 را به دو مولفه شاقولی و افقی تجزیه کرد. برای این کار روی خط افقی قطعه‌ای برابر $v_{افقی} \times t$ یعنی راهی که گلوله بعد از گذشت t ثانیه در طول خط افقی پیش خواهد رفت، جدا میکنیم.

ولی گلوله در عین حال ببالا نیز حرکت میکند. جسم بعد از t ثانیه به ارتفاع $h = v_{شاقولی} t - \frac{gt^2}{2}$ بالا خواهد رفت.

مقادیر زمانی لازم را در این فرمول قرار میدهیم و ارتفاعهای بدست‌آمده را روی محور شاقولی میبریم. ابتدا مقادیر h زیاد میشوند (اوجگیری) و بعد کاهش میبابند.

بعد از تعیین نقاط خطسیر میتوان، بطریقی که در مثال قبل گفته شد، منحنی خطسیر را کشید.

اگر لوله‌ی سلاح افقی باشد، گلوله‌ی تیراندازی شده زود به زمین خواهد خورد. و اگر لوله شاقولی قرار گیرد، گلوله به همان نقطه تیراندازی خواهد افتاد. برای تیراندازی به نقاط دوردست باید لوله‌ی سلاح را تحت زاویه‌ی معینی نسبت به افق قرار داد. ولی تحت چه زاویه‌ای؟

در اینجا باز هم از همان شیوه‌ی قبلی استفاده میکنیم، یعنی بردار سرعت اولیه را به دو جزء ترکیبی آن تجزیه میکنیم: سرعت در خط شاقولی برابر v_1 در خط افقی برابر v_2 است. زمان از لحظه‌ی تیراندازی تا لحظه رسیدن گلوله به بلندترین نقطه‌ی خطسیرش برابر $\frac{v_1}{g}$ است. همان مدت زمان هم برای فرود گلوله لازم است، یعنی مدت زمان کامل سیر گلوله از دهانه‌ی لوله تا نقطه فرود $\frac{2v_1}{g}$ است.

چون حرکت در جهت افقی یکنواخت است، مسافت از نقطه مبدأ تا نقطه فرود («برد» خطسیر) برابر خواهد بود با

$$S=\frac{2v_1v_2}{g}$$

(باید بگوییم که ما در تمام فرضیاتمان بلندی سلاح (دهانه‌ی لوله) از سطح زمین را نادیده گرفته‌ایم).

فرمول بدست آمده نشان میدهد که برد خطسیر با حاصلضرب مؤلفه‌های سرعت متناسب است. حال ببینیم که تحت چه زاویه تیراندازی حاصلضرب مزبور بیشترین مقدار را خواهد داشت؟ این مساله را میتوان به زبان هندسی بیان کرد. سرعتهای v_1 و v_2 مربع مستطیل سرعتها را تشکیل میدهند که قطر آن سرعت کامل v است. حاصلضرب v_1 v_2 برابر است با مساحت این مربع مستطیل.

مساله به این صورت در میآید که اگر درازای قطر مربع مستطیل مقدار ثابت و معینی فرض شود، اضلاع آن را چگونه باید بگیریم که مساحت مربع مستطیل بیشترین مقدار را دارا باشد. در هندسه ثابت شده است که این شرط را شکل مربع برای ما تأمین میکند. یعنی برد گلوله وقتی به حد اکثر خواهد رسید که $v_1=v_2$ باشد، یعنی مربع مستطیل سرعتها تبدیل شود به مربع. قطر مربع سرعتها با ضلع افقی آن زاویه ۴۵° تشکیل میدهد. بنابراین تحت همین زاویه هم باید تیراندازی کرد تا گلوله در دورترین نقطه از مبدأ تیر به سطح زمین فرود آید.

اگر v سرعت کامل گلوله باشد، در شرایط مربع $v_1=v_2=\frac{v}{\sqrt{2}}$ است. فرمول برد گلوله در این حالت که بهترین حالت است، به

این صورت درمیآید: $s=\frac{v^2}{g}$، یعنی برد گلوله دو برابر ارتفاع اوج بهنگام تیراندازی به بالا با همان سرعت اولیه خواهد بود.

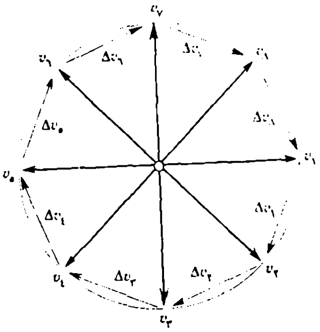
ارتفاع بلندترین نقطه‌ی اوج گلوله در حالت تیراندازی با زاویه‌ی ۴۵° عبارتست از $h=\frac{v_1^2}{2g}=\frac{v^2}{4g}$، یعنی چهار بار کمتر از برد گلوله.

باید متذکر گشت که فرمولهائی که ما در این مبحث بکار بردیم، فقط در صورتی نتایج دقیق بدست خواهند داد که در مسیر حرکت جسم هوا وجود نداشته باشد — شرطی که بکلی دور از واقعیت است. مقاومت هوا در بسیاری موارد نقش تعیین‌کننده بازی میکند و وضع را بکلی تغییر میدهد.

حرکت دورانی

اگر نقطه‌ای روی خط‌سیر دایروی حرکت میکند، یعنی حرکت شتابدار است، لااقل باین دلیل که سرعت در هر لحظه تغییر جهت میدهد. مقدار سرعت ممکنست در تمام مدت حرکت تغییر نکند و ما نیز دقت اصلی خودمان را بویژه روی این حالت معطوف میداریم.

بردارهای سرعت در فواصل زمانی متوالی را از یک نقطه مبدأ رسم میکنیم. (ما حق این کار را داریم.) اگر بردار سرعت باندازه زاویه‌ی کوچکی بچرخد، قاعده‌ی مثلث متساوی‌الساقین حاصله، بطوریکه میدانیم، نمایشگر تغییر سرعت خواهد بود. با این ترتیب تغییرات سرعت را در مدت یک دور کامل دوران جسم رسم میکنیم (شکل ۱۷). مجموع مقادیر تغییرات سرعت در مدت یک دور کامل برابر خواهد بود با مجموع اضلاع کثیرالاضلاع ترسیمی. ضمناً باید بگوئیم که ما در ترسیم هر مثلث کوچک فرض کردیم که تغییرات بردار سرعت بطور جهشی صورت میگیرد. در صورتیکه در واقع بردار سرعت متوالیا تغییر جهت میدهد. کاملاً روشن است که هر اندازه زاویه‌ی مرکزی مثلث کوچک را کوچکتر بگیریم، اشتباه کمتر خواهد بود. هر چه



شکل ۱۷

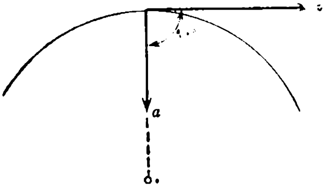
اضلاع کثیر الاضلاع کوچکتر باشند، بیشتر به محیط دایره‌ی با شعا
v نزدیک میشوند. بنابراین مقدار دقیق مجموع مقادیر مطلق تغییرا
سرعت در مدت یک دور چرخش نقطه برابر است با طول محیط دا
یعنی $v\,\pi$ ۲. از تقسیم این طول بر زمان یک دور کامل چرخش
T مقدار شتاب بدست خواهد آمد.

بنا بر این، کمیت شتاب در حرکت یکنواخت دایروی با فرمو
$a=\frac{۲\pi v}{T}$ تعیین میشود.

مدت زمان یکدور کامل چرخش در حرکت روی دایره‌ی به شعاع
R را میتوان باین صورت نوشت: $T=\frac{۲\pi R}{v}$. با مقایسه‌ی دو فرمول
اخیر فرمول شتاب باین صورت در میآید: $a=\frac{v^{۲}}{R}$.

در صورتیکه شعاع دوران ثابت باشد، شتاب با مجذور سرعت متناسب
است، و در صورتیکه سرعت ثابت باشد، شتاب با شعاع نسبت معکوس
دارد.

از تحلیل بالا جهت بردار شتاب حرکت دایروی در هر لحظه
معیین معلوم میشود. هر چه زاویه‌ی راس مثلثهای متساوی الساقینی
که ما در استدلال خود بکار بردیم کوچکتر باشد، زاویه‌ی حاصله بین
اضافه رشد سرعت و سرعت به ۹۰° نزدیکتر است.



شکل ۱۸

یعنی در حرکت دورانی یکنواخت جهت شتاب عمود بر سرعت است. پس سرعت و شتاب نسبت به خطسیر چه جهتی دارند؟ چون سرعت ماس بر خط حرکت است، بنابراین شتاب در جهت شعاع و متوجه رکز دایره است. این روابط در شکل ۱۸ بخوبی دیده میشوند.

سنگی را سر ریسمانی ببندید و آنرا بگردانید. شما کاملاً احساس نواهید کرد که برای این کار باید مقداری تلاش عضلاتی بکار ببرید. تن نیرو برای چه لازمست؟ مگر جسم یکنواخت حرکت نمیکند؟ ماله در همینجا است، باید بگوئیم: نه. جسم با سرعتی که از باظ مقدار ثابت است حرکت میکند، ولی تغییر دائمی جهت سرعت ن حرکت را شتابدار میکند. نیرو برای آن لازمست که جسم را راه مستقیمی که به پیروی از اینرسی خودش میخواهد بپیماید منحرف ازد. نیرو برای آن لازمست که آن شتاب $\frac{v^2}{R}$ را که ما در بالا حاسبه کردیم، بوجود آورد.

بموجب قانون نیوتن، شتاب در هر سمت که باشد، نیرو هم متوجه همان سمت خواهد بود. یعنی جسمی که روی محیط دایره با سرعت ثابت دوران میکند، باید زیر تأثیر نیروئی قرار گیرد که در جهت شعاع و متوجه مرکز دوران باشد، نیروئی که از طرف ریسمان به سنگ وارد میشود و شتاب $\frac{v^2}{R}$ را تامین میکند. بنابر این کمیت این نیرو برابر است با $\frac{mv^2}{R}$.

ریسمان سنگ را میکشد، سنگ ریسمان را. ما در این دو نیرو، بمنزله شیء و تصویرش در آینه، نیروهای عمل و عکس‌العمل را میبینیم. غالباً نیروئی را که از جانب سنگ به ریسمان وارد میآید، نیروی

گریز از مرکز مینامند. بنابر این نیروی گریز از مرکز برابر است با $\frac{mv^2}{R}$ و جهت آن در امتداد شعاع و بسوی خارج دایره است. نیروی گریز از مرکز به جسمی وارد آمده است که در مقابل گرایش اینرسیال جسم دوران کننده که میخواهد روی خط مستقیم حرکت کند، مقاومت مینماید.

آنچه که در بالا گفته شد برای موردی که نیروی جاذبه نقش «ریسمان» را بازی میکند نیز صادق است. کره‌ی ماه دور زمین میچرخد. چه چیزی این قمر سیاره‌ی مارا در مدارش نگاه میدارد؟ چرا بحکم قانون اینرسی از مدار خارج نمیشود و به سیر در فضای بین کرات نمی‌پردازد؟ برای اینکه کره‌ی زمین ماه را با «ریسمان نامرئی» نیروی جاذبه نگاه میدارد. این نیرو برابر است با $\frac{mv^2}{R}$ که در آن v سرعت حرکت در مدار ماه و R فاصله‌ی از زمین تا ماه است. نیروی گریز از مرکز در این مورد به کره‌ی زمین وارد میآید، ولی بعلت جرم زیاد کره زمین تأثیرش در حرکت سیاره‌ی ما ناچیز است.

فرض کنیم که میخواهیم ماهواره‌ی مصنوعی کره‌ی زمین را به مدار دایروی بفاصله ۳۰۰ کیلومتری از سطح زمین پرتاب کنیم. سرعت ماهواره چقدر باید باشد؟ در فاصله‌ی ۳۰۰ کیلومتری، شتاب نیروی جاذبه کمی کمتر از شتاب در سطح زمین و برابر $۸{,}۹ \ m/s^2$ است. شتاب ماهواره که روی مدار دایروی حرکت میکند، برابر است با $\frac{v^2}{R}$ که در آن R ، فاصله از مرکز دوران (یعنی از مرکز زمین)، تقریبا برابر ۶۶۰۰ کیلومتر یا $۶{,}۶\times ۱۰^{۶} m$ میباشد. از سوی دیگر این شتاب برابر است با شتاب نیروی ثقل g . بنابر این $g=\frac{v^2}{R}$ ، و از اینجا v یا سرعت حرکت ماهواره در مدار را میتوان بدست آورد:

$$v=\sqrt{gR}=\sqrt{۸{,}۹\times ۶{,}۶\times ۱۰^{۶}}=۷۷۰۰\, m/s=۷{,}۷ km/s$$

حداقل سرعت لازم برای آنکه جسمی که بطور افقی پرتاب شده است ماهواره‌ی زمین گردد، اولین سرعت کیهانی نامیده میشود. از مثال بالا معلوم میشود که این سرعت نزدیک ۸ کیلومتر در ثانیه است.

حرکت از دیدگاه «غیرمعقول»

اصل تعادل

در مبحث پیشین ما «دیدگاه معقول نسبت به حرکت» را مورد بررسی قرار دادیم. در واقع معلوم شد که دیدگاههای «معقولی» که ما آنها را بنام سیستم‌های اینرسیال خواندیم بی‌نهایت متعددند.

اکنون، پس از کسب اطلاع از قوانین حرکت میتوانیم به بررسی آن از دیدگاههای «غیر معقول» بپردازیم. تمایل بدرک نحوه وجود سیستم‌های غیر اینرسیال بهیچوجه جنبه تفننی ندارد، زیرا ما خود ساکن چنین سیستمی هستیم.

فرض کنیم که ما وسائل گوناگون اندازه‌گیری را با خود برداشته سوار سفینه فضائی شده و راهی سیر در جهان ستارگان گشته‌ایم.

زمان به تندی میگذرد. خورشید دیگر به ستاره‌ای کوچک شبیه شده است. موتور خاموش است و سفینه ما دور از اجرام کشش‌دار قرار دارد.

ببینیم حالا در آزمایشگاه پرنده ما چه میگذرد. ... گرماسنجی که از سر میخ کنده شده و در هوا معلق است فرو نمیافتد؟آونگ آویخته بر دیوار با چه وضع شگفت‌آوری از حالت شاقولی منحرف و در جای میخکوب شده است. بزودی متوجه رمز کار میشویم. کافی است بخاطر بیاوریم که سفینه ما در کره‌ی زمین نیست بلکه در فضای بین سیارات قرار دارد و در اینحالت اشیاء وزن خود را از دست داده‌اند.

پس از مشاهده این صحنه غیر عادی تصمیم میگیریم جهت حرکت را تغییر بدهیم. با فشاری بر روی تکمه موتور جت را روشن می‌کنیم. ناگهان اشیاء دور و بر ما جان میگیرند. تمام اجسامی که محکم

نصب نشده بودند بحرکت در میایند. گرماسنج میافتد، آونگ شروع به نوسان میکند و ضمن کسب آرامش تدریجی حالت شاقولی بخود میگیرد، بالش بدون مقاومت زیر چمدانی که بر آن قرار دارد فرو میرود. نگاهی به جهت‌یاب میکنیم تا دریابیم سفینه ما بکدام سو سیر شتابدار خود را آغاز کرده است. البته بسوی بالا و وسائل اندازه‌گیری شتاب $9,8 m/s^2$ را که در مقایسه با امکانات سفینه شتاب کمی است نشان میدهند. احساس ما کاملاً عادی است و خود مانرا درست مثل روی زمین حس میکنیم. اما چرا اینطور است؟ چرا با وجود فقدان نیروی کشش که معلول دوری غیر قابل تصور سفینه ما از اجرام جاذبه‌دار است، اشیاء واجد وزن شده‌اند.

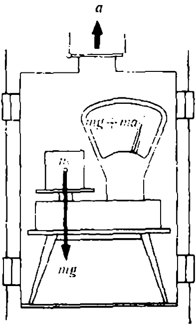
در اینموقع گویی را که در کف داریم رها میکنیم و شتاب سقوط آنرا به کف سفینه اندازه میگیریم. شتابش همان $9,8 m/s^2$ است. این رقم را لحظه‌ای پیش روی وسائلی که شتاب موشک را نشان میدهند خوانده بودیم. این بدانمعنی است که سفینه با همان شتابی به بالا میرود که اشیاء در آزمایشگاه پرنده ما به پائین میافتند.

مفاهیم «بالا» و «پائین» در سفینه پرنده چیست؟ روی زمین مسئله ساده بود. آسمان بالا و زمین پائین محسوب میگشت، ولی اینجا مفهوم «بالا» برای ما یک نشانه دارد که همان جهت شتاب موشک است.

مثل اینکه درک مفهوم مشاهدات ما چندان مشکل نیست. در حقیقت هیچ نیروئی بر گوی رهانیده از دست ما تأثیر نمیکند. گوی تنها با اینرسی خود بحرکت درمیاید. حرکت شتابدار موشک نسبت به گوی در ما که در موشک هستیم این تصور را بوجود میاورد که گوی در جهت عکس شتاب موشک سقوط میکند. بدیهی است که شتاب «سقوط» از نقطه نظر کمی برابر است با میزان شتاب واقعی موشک و همه اجسام واقع در موشک نیز با شتابی یکسان سقوط میکنند.

از مجموع گفته‌ها می‌توان به نتیجه جالبی رسید. در موشک در حال حرکت شتابدار اجسام واجد وزن میشوند. دراین وضع نیروی «جاذبه» در جهت عکس شتاب موشک بروز میکند و شتاب سقوط آزاد از لحاظ کمی برابر شتاب حرکت سفینه موشکی است. از همه

جالبتر اینست که ما عملاً قادر به تمایز حرکت شتابدار سیستم از نیروی ثقل مربوط نیستیم*. در سفینه فضائی پشت پنجره‌های بسته ما طبعاً نمی‌توانیم بدانیم که آیا سفینه بیحرکت در روی زمین قرار دارد و یا با شتابی معادل ۹,۸m/s۲ در حال حرکت است. هم ارزی شتاب و تأثیر نیروی ثقل را در فیزیک اصل تعادل مینامند.



شکل ۱۹

چنانکه ما از روی نمونه‌های فراوان خواهیم دید، این اصل امکان میدهد که بااضافه کردن نیروی ثقل مجازی موجود در سیستمهای متحرک شتابدار به نیروهای واقعی بحل سریع بسیاری از مسائل بپردازیم.

بعنوان نخستین مثال آسانسور را در نظر میگیریم. یک ترازوی فنری و وزنه‌هائی را با خود برداشته و با آسانسور بطرف بالا میرویم. عقربه‌های ترازو را که رویش وزنه‌ی یک کیلوگرمی نهاده‌ایم زیر نظر میگیریم (شکل ۱۹). در آغاز صعود مشاهده میکنیم که عقربه ترازو بیش از یک کیلوگرم را نشان میدهد، مثل اینکه وزنه سنگین‌تر شده است. این پدیده را بر مبنای اصل تعادل بسادگی میتوان توضیح داد. هنگام حرکت آسانسور به بالا با شتابی معادل a، نیروی ثقلی اضافی که متوجه پائین است بوجود میاید. از آنجا که شتاب این نیرو مساوی a است، وزن اضافی برابر ma میباشد و ترازو وزنی

---

*البته فقط عملاً، وگرنه تفاوت اساساً موجود است. در روی زمین نیروی ثقل در امتداد شعاعها متوجه مرکز کره است، یعنی در دو نقطه متفاوت، جهات شتاب بین خود زاویه‌ای تشکیل میدهند. اما در موشک در حال حرکت شتابدار جهات ثقل در تمام نقاط کاملاً با یکدیگر موازیند. در روی زمین شتاب با تغییر ارتفاع دگرگون میشود، در صورتیکه در موشک متحرک چنین چیزی وجود ندارد.

معادل $mg+ma$ را نشان میدهد. ولی بعد از لحظه‌ای با از بین رفتن شتاب و شروع حرکت یکنواخت آسانسور فنر ترازو به جای اولیه‌اش برگشته و عقربه همان یک کیلوگرم سابق را نشان میدهد. با نزدیک شدن به طبقه فوقانی حرکت آسانسور کند میشود. در این حالت ترازو چه وزنی را نشان خواهد داد؟ البته کمتر از یک کیلوگرم. در جریان کند شدن حرکت آسانسور، بردار شتاب متوجه پائین است و نیروی مجازی ثقل اضافی متوجه بالا یعنی جاذبه زمین. در این مورد a منفی است و ترازو مقداری کمتر از mg را نشان میدهد. پس از توقف آسانسور فنر ترازو باز بجای اولیه خود باز میگردد. حال شروع به پائین آمدن میکنیم. حرکت آسانسور شتابدار میشود. بردار شتاب متوجه پائین است، یعنی جهت نیروی ثقل اضافی بطرف بالاست. در اینحالت وزنه کمتر از یک کیلوگرم وزن دارد. وقتیکه حرکت دوباره یکنواخت شد ثقل اضافی از بین میرود و قبل از اتمام حرکت ما با آسانسور، یعنی در لحظه کند شدن سرعت فرود آمدن، وزن بار دیگر از یک کیلوگرم تجاوز خواهد کرد.

احساس نامطبوعی که بهنگام شتابگیری سریع و کند شدن آنی آسانسور بما دست میدهد مربوط به همین تغییرات وزن است که مورد بررسی قرار گرفت.

اگر آسانسور با شتاب فرود آید اجسام واقع در آن گوئی سبکتر میشوند. هر اندازه شتاب فزونتر باشد وزن کمتر میشود. اگر این سیستم با شتاب سقوط آزاد فرود آید چه خواهد شد؟ پاسخ روشن است. در اینگونه موارد اجسام دیگر فشاری به کف آسانسور وارد نمیاورند — بعبارت دیگر وزن خود را از دست میدهند: نیروی جاذبه زمین با نیروی ثقل اضافی موجود در این سیستم در حال سقوط آزاد متعادل میگردد. در چنین آسانسوری براحتی میتوان بار یک تنی‌را بر دوش نهاد.

در آغاز این قسمت ما به توصیف زندگی «بدون وزن» در سفینه واقع در فضای بین سیارات بیرون از محیط جاذبه پرداختیم. در صورتیکه چنین سفینه‌ای حرکتی یکنواخت و مستقیم داشته باشد در آن اجسام بحالت بی وزنی درمیایند، اما باید گفت که عین همین حالت نیز ضمن سقوط آزاد سیستم بچشم میخورد. در هر سفینه

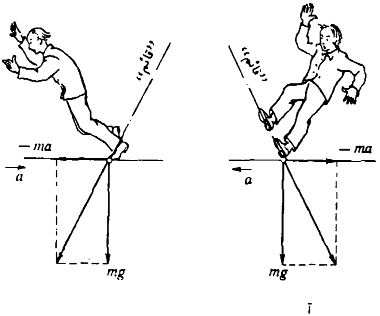
سیاره پیمائی که با موتور خاموش حرکت کند وزنی موجود نیست. سقوط آزاد هر سیستمی، بنوبه خود، منجر به از دست دادن وزن آن میشود. اصل تعادل مارا باین نتیجه رساند که سیستم محاسبه دارای حرکت مستقیم و یکنواخت که بیرون از محیط تاثیر نیروی جاذبه واقع شده است و سیستم محاسبه‌ای که تحت تاثیر نیروی جاذبه آزادانه سقوط میکند تقریباً همسنگی کامل دارند (به پاورقی صفحه ۶۵ مراجعه شوید). در سیستم اول وزنی موجود نیست و در سیستم دوم «وزن پائین گرا» با «وزن بالا گرا» متعادل میگردد. ظاهراً هیچگونه تفاوتی بین این دو سیستم بچشم نمیخورد.

در ماهواره کره زمین زندگی «بدون وزن» از لحظه‌ای آغاز میشود که سفینه وارد مدار شده و حرکت خود را بدون تاثیر موشک آغاز میکند.

اولین سیاح سیاره پیما سگی بود بنام «لایکا» و پس از چندی انسان هم با زندگی «بدون وزن» در محفظه سفینه فضائی آشنائی یافت. نخستین انسان در این راه خلبان فضانورد شوروی یوری گاگارین بود.

زندگی در محفظه سفینه را نمی‌توان عادی انگاشت. قدرت ابتکار و اختراع فراوانی لازم بود تا اشیائی‌را که باین سهولت تابع نیروی جاذبه هستند فرمانبردار ساخت. مثلاً، چطور میشود آب را از استکان ریخت، در حالیکه آب تحت تاثیر نیروی ثقل «پائین» سیریزد. چگونه میتوان خوراک پخت، در صورتیکه امکان گرم کردن آب روی اجاق نیست (آب گرم و سرد باهم مخلوط نمیشوند). چطور با مداد میتوان روی کاغذ نوشت در حالیکه یک ضربه کوچک مداد بر میز کافیست که نویسنده را به کناری پرت کند. نه کبریت، نه شمع و نه چراغ گازی هیچکدام نخواهند سوخت، چونکه گزهای احتراق متصاعد نمیشوند (در آنجا بالائی موجود نیست) و در نتیجه نمیگذارند اکسیژن لازم برای سوختن برسد. حتی برای جریانهای طبیعی که در بدن انسان میگذرد نیز فکری میبایست کرد، زیرا این جریانها به نیروی جاذبه زمین «خو» گرفته‌اند.

اکنون به مشاهدات فیزیکی در اتوبوس و یا تراموای در حال حرکت شتابدار می‌پردازیم. وجه تمایز این مثال از مورد پیشین در



شکل ۲۰

این است که در آسانسور ثقل اضافی و جاذبه زمین در امتداد یک خط عمل میکردند، ولی در تراموای در حال سرعت‌گیری و یا ترمز، نیروی ثقل اضافی با نیروی جاذبه زمین زاویه قائمه تشکیل میدهد. این حالت هر چند برای مسافرین عادی است، ولی در آنان احساسی خاص برمیانگیزد. اگر تراموای سرعت بگیرد نیروی اضافی در جهت عکس حرکت تأثیر میکند. این نیرو را با نیروی جاذبه زمین جمع میکنیم. در مجموع، بر شخص واقع در واگن نیروئی تاثیر خواهد کرد که نسبت به سمت حرکت تراموای زاویه‌ای منفرجه تشکیل میدهد. در صورتیکه ما در واگن رو بسمت حرکت قرار گرفته باشیم احساس میکنیم که «بالا»ی ما جابجا میشود. برای اینکه نیافتیم کوشش خواهیم کرد، چنانکه در تصویر آ, ۲۰ نشان داده شده بطور «قائم» بایستیم. منتهی «خط قائم» ما کج است و با زاویه‌ای تند بسوی جهت حرکت تراموای متمایل میشود. در این حالت اگر دستمانرا بجائی نگیریم حتماً از پشت خواهیم افتاد.

بالاخره حرکت تراموای یکنواخت میشود و ما میتوانیم مدتی راحت بایستیم، ولی تازه داریم به ایستگاه جدیدی نزدیک میشویم.

راننده تراموای ترمز میکند و ... «خط قائم» ما از نو انحراف مییابد. چنانکه در تصویر ب,۲۰ نشان داده شده است، این بار با جهت حرکت زاویه‌ای تند تشکیل میدهد. مسافر برای اینکه نیافتد باید به عقب خم شود ولی او در این حالت دیری نمیماند. واگون متوقف میشود. کند شدن حرکت از بین میرود و «خط قائم» ما از نو بحالت عادی خود باز میگردد. ما دوباره مجبور میشویم وضع خود را تغییر بدهیم. شما میتوانید آزمایش کنید چه احساسی بشما دست میدهد. هنگام ترمز کردن درست مثل اینست که کسی از پشت سر شما را هل میدهد (خط قائم پشت سر شما قرار دارد). شما «راست می‌ایستید» ولی اکنون دیگر واگن متوقف شدة است و خط قائم جلو شماست و بنابر این احساس میکنید که گویا شما را از جلو هل میدهند.

در جریان حرکت تراموای در مسیری منحنی نیز پدیده‌های مشابهی روی میدهد. ما میدانیم که حرکت در مسیر دایره‌ای حتی باوجود ثابت ماندن کمی سرعت شتابدار است. شتاب $\frac{v^2}{R}$ هر قدر سرعت تراموای بیشتر و شعاع منحنی کوچکتر باشد زیادتر است. شتاب این حرکت در امتداد شعاع بسوی مرکز متوجه است که خود معادل پیدایش ثقل اضافی در جهت گریز از مرکز می‌باشد. لذا در سر پیچ سرنشین تراموای تحت تاثیر نیروی اضافی $\frac{mv^2}{R}$ قرار میگیرد که اورا بطرف خارج پیچ میراند. نیروی شعاعی $\frac{mv^2}{R}$ را نیروی گریز از مرکز می‌نامند. قبلاً در صفحه ۶۱ نیز ما بهمین نیرو ولی تا حدی از دیدگاه دیگر برخورد کرده بودیم.

اثر نیروی گریز از مرکز در تراموای و یا اتوبوس در حال دور زدن تنها می‌تواند باعث ناراحتی مختصری شود. نیروی $\frac{mv^2}{R}$ در این حالت زیاد نیست. اما ضمن حرکت سریع در مسیر دایره‌ای نیروهای گریز از مرکز می‌توانند تا حد زیادی ارتقاء یافته و برای زندگی خطرناک شوند. خلبانان در هنگام معلق زدن در هوا با مقدار زیادی $\frac{mv^2}{R}$ رو برو میشوند. هنگامیکه هواپیما دایره‌ای در هوا ترسیم میکند تاثیر

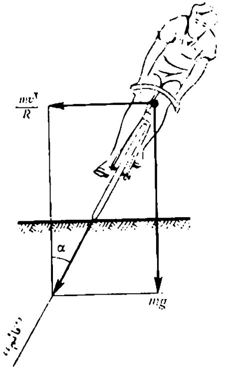
نیروی گریز از مرکز بر خلبان آنقدر زیاد است که وی را بصندلی میچسباند. هر قدر مدار حلقه تنگتر باشد، ثقل اضافی که خلبانرا به صندلی میچسباند بیشتر است. اگر فشار ثقل اضافی خیلی زیاد شود، ممکنست بدن شخص تاب نیاورد و از هم «فرو باشد»، زیرا بافت‌های ارگانیسم زنده دارای استحکام محدودی می‌باشند و قادر به تحمل هر سنگینی نیستند.

انسان بدون خطر جدی برای حیاتش تا چه حد می‌تواند «سنگین شود»؟ این امر مربوط به طول مدت تاثیر فشار است. اگر این مدت از چند جزء ثانیه تجاوز نکند انسان قادر است وزنی معادل ۸ تا ۱۰ مرتبه سنگین‌تر از وزن خود را تحمل کند. یعنی فشار اضافی بمیزان ۷ تا ۹ برابر g. در مدت ده ثانیه خلبان قادر به تحمل فشار اضافی معادل ۳ تا ۵ برابر g می‌باشد. برای فضا نوردان میزان فشار اضافی که انسان در طول دهها دقیقه و شاید ساعتها قادر به تحمل آن باشد مطرح است. در این قبیل موارد فشار اضافی باید بمراتب کمتر باشد.

حال به محاسبه شعاع حلقه‌ای که خلبان میتواند با هواپیمایش در سرعتهای متفاوت، بدون خطر ترسیم کند می‌پردازیم. کمیت شتاب را معادل عدد میانگین g ٤ میگیریم. یعنی $\frac{v^2}{R}=4g$ و $R=\frac{v^2}{4g}$. در صورت وجود سرعتی معادل ۳٦۰ km/h=۱۰۰ m/s شعاع حلقه ۲۵۰ متر خواهد بود؛ اگر سرعت چهار برابر یعنی ۱٤٤۰ km/h شود (هواپیماهای جت معاصر مدتهاست که از این حد سرعت فراتر رفته‌اند)، شعاع حلقه باید ۱٦ بار بزرگتر شود. کمترین شعاع حلقه در این حال برابر ٤ کیلومتر خواهد بود.

حال توجه شما را به نوع دیگری از وسائل نقلیه یعنی دوچرخه جلب میکنیم. همه دیده‌اند که چگونه دوچرخه سوار ضمن پیچیدن، از حالت قائم بطرف داخل دایره متمایل میشود. فرض کنیم دوچرخه با سرعت v دایره‌ای بشعاع R ترسیم میکند. یعنی دارای شتابی است معادل $\frac{v^2}{R}$ که جهتش بسوی مرکز دایره است. در اینصورت علاوه بر نیروی جاذبه زمین دوچرخه‌سوار تحت تاثیر نیروی گریز از مرکز

نیز قرار خواهد گرفت که روی خط افقی و در جهت گریز از مرکز دایره است. در شکل ۲۱ این نیروها و برایند شان داده شده‌اند. واضح است که دوچرخه‌سوار برای اجتناب از افتادن باید خود را در حالت «قائم» نگاه دارد. اما ... حالا دیگر خط قائم او با خط عمود بر سطح زمین منطبق نیست. از تصویر پیداست که بردارهای $\frac{mv^2}{R}$ و mg اضلاع مجاور زاویه قائمه هستند. نسبت ضلع مقابل زاویه α به ضلع مجاور آنرا در مثلثات تانژانت این زاویه می‌نامند. در این مورد $\operatorname{tg}\alpha=\frac{v^2}{Rg}$ است؛ جرم m

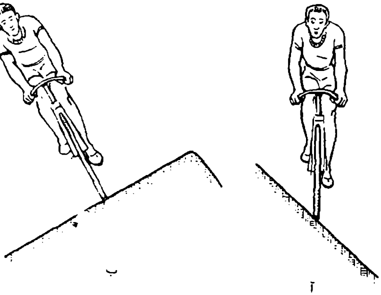


شکل ۲۱

از صورت و مخرج حذف شده است یعنی زاویه تمایل دوچرخه‌سوار به جرم او بستگی ندارد و راننده خواه چاق باشد و خواه لاغر بیک اندازه متمایل میشود. فرمول و مثلث کشیده شده در شکل بستگی درجه تمایل را با سرعت حرکت (رابطه مستقیم) و شعاع دایره (رابطه معکوس) نشان میدهد.

ما توضیح دادیم که حالت قائم دوچرخه‌سوار با خط قائم زمین منطبق نیست. در این صورت دوچرخه‌سوار دارای چه احساسی خواهد بود. برای پاسخ باین سئوال لازم است تصویر ۲۱ را بچرخانیم. در این صورت جاده شکل دامنه کوه را بخود میگیرد (تصویر ۲۲،آ) و ما می‌بینیم که در صورت مکفی نبودن نیروی اصطکاک بین لاستیک دوچرخه و پوشش راه (خیس بودن اسفالت) دوچرخه ممکن است بلغزد و پیچش تند منجر به افتادن آن در راه آب کنار جاده شود.

برای اجتناب از این حادثه است که سرپیچهای تند (یا باصطلاح ویراژها) جاده را مایل درست میکنند، یعنی افقی برای دوچرخه سوار



شکل ۲۲

(چنانکه در تصویر ب,۲۲ نشان داده شده است). پیستهای دوچرخه‌رانی و جاده‌های اتومبیل‌رو را سر پیچها همینطور میسازند و بدینوسیله احتمال سر خوردن تا حد زیادی کاسته میشود و یا حتی کاملاً مرتفع میگردد.

چرخش

اکنون به بررسی سیستم‌های چرخنده می‌پردازیم. حرکت چنین سیستمهائی بوسیله تعداد دورهائی که آنها در یک ثانیه ضمن چرخش بدور محور خود انجام میدهند تعیین میگردد. البته لازم است جهت چرخش را نیز دانست.

برای درک بهتر ویژگیهای زندگی در سیستمهای چرخنده، «چرخ خنده» را که از وسائل تفریحی معروف است مورد بررسی قرار میدهیم. ساختمان آن بسیار ساده است. دیسک همواری بقطر در حدود چند متر بسرعت میچرخد. از علاقمندان دعوت بعمل میاید که روی آن نشسته و سعی کنند خود را نگه دارند. حتی کسانی هم که از فیزیک اطلاعی ندارند، بزودی رمز موفقیت را در می‌یابند و میفهمند که

باید در مرکز دیسک جای گیرند، چون هر اندازه که از مرکز دیسک دورتر شوند نگه داشتن خود مشکل تر میشود.

اینگونه دیسک سیستم غیر اینرسیالی است که دارای برخی خواص ویژه میباشد. هر شیئی متصل به دیسک با سرعت v یعنی با شتابی معادل v^2/R روی دایره‌ای با شعاع R بحرکت در خواهد آمد. حالا دیگر ما میدانیم که از دیدگاه یک ناظر غیر اینرسیال این بمعنی وجود ثقل اضافی mv^2/R میباشد که در امتداد شعاع و در جهت گریز از مرکز است. این نیروی ثقل شعاعی بر تمام نقاط «چرخ شیطان» تاثیر میکند و شتابی معادل v^2/R بوجود میاورد. برای کلیه نقاط روی محیط یک دایره کمیت این شتاب یکسان است. اما روی دایره‌های مختلف‌المرکز چطور؟ عجله نکنید که بگوئید گویا با نزدیک شدن بمرکز شتاب بر طبق فرمول v^2/R زیاد خواهد شد چون درست نیست. دلیلش اینست که سرعت نقاط دورتر از مرکز بیشتر است. واقعاً هم اگر تعداد دورهائی را که چرخ در یک ثانیه انجام میدهد با حرف n نشان دهیم، مسافتی را که یک نقطه روی چرخ، واقع در فاصله R از مرکز آن، در یک ثانیه طی میکند یعنی سرعت این نقطه $2\pi Rn$ خواهد بود.

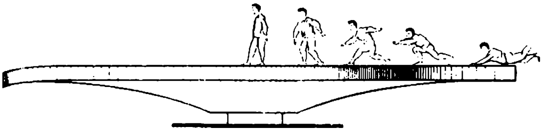
سرعت نقطه با فاصله آن از مرکز نسبت مستقیم دارد. روی این اصل فومول شتاب را میتوان بشکل زیر نوشت:

$$a = 4\pi^2 n^2 R$$

چون تعداد دور در ثانیه برای تمام نقاط چرخ یکسان است بدین نتیجه میرسیم که شتاب نیروی «ثقل شعاعی» موثر بر هر نقطه چرخ گردان به نسبت دوری از مرکز افزایش میيابد.

در این سیستم غیر اینرسیال نیروی ثقل در دوایر مختلف متفاوت است. این بدانمعنی است که جهات «خطوط قائم» برای اجسام واقع در مسافات مختلف از مرکز نیز متفاوت میباشند. نیروی جاذبه زمین البته در تمام نقاط چرخ یکسان است ولی بردار معرف ثقل شعاعی اضافی با دور شدن از مرکز درازای بیشتری پیدا میکند، یعنی اقطار مستطیل‌ها که برایند دو نیرو را نشان میدهند بیش از پیش از خط قائم زمین منحرف میشوند.

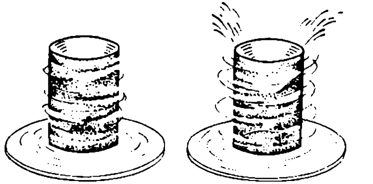
برای بیان احساسات متوالی شخص لغزان بر روی «چرخ خنده» باید



شکل ۲۳

بگوئیم که بنظر او دیسک با دوری از مرکز « تمایل بیشتری پیدا میکند» و روی این اصل نگه داشتن خود روی آن مشکل‌تر میگردد.

آیا نمیشود برای این سیستم اینرسیال هم چیزی شبیه جاده مایل در مثال پیشین تعبیه نمود؟ البته که میشود. برای این کار باید دیسک را با چنان سطحی تعویض کرد که در هر نقطه آن نیروی کامل ثقل بر این سطح عمود باشد. شکل چنین سطحی را میتوان محاسبه کرد. آنرا جسم شلجمی (پارابولوئید) می‌نامند. این نامگذاری نیز تصادفی نیست، زیرا هر مقطع قائم جسم شلجمی یک منحنی شلجمی است، یعنی منحنی که اجسام روی آن سقوط میکنند. جسم شلجمی بوسیله چرخش منحنی شلجمی بدور محور خود بوجود میاید. اینگونه سطوح را با چرخش سریع ظرف آبی بآسانی میتوان ایجاد کرد. سطح مایع در حال چرخش، جسم شلجمی است. تغییر مکان ذرات مایع موقعی متوقف میشود که نیروی چسباننده ذرات به سطح، بر آن عمود باشد هر سرعت چرخشی سطح شلجمی خاص خود را بوجود میاورد (شکل ۲٤).



شکل ۲٤

با درست کردن یک جسم شلجمی جامد آشکارا می‌توان خواص آنرا نمایش داد. گلوله کوچک واقع در هر نقطه جسم شلجمی که با سرعت معینی در حال چرخش است ساکن بر جای میماند. این بدانمعنی است که نیروی موثر بر گلوله عمود بر سطحی است که گلوله در آن قرار گرفته است. بعبارت دیگر سطح جسم شلجمی در حال چرخش انگار دارای خواص سطح افقی است. روی چنین سطحی میتوان مثل روی زمین راه رفت و خود را کاملاً متوازن حس نمود. اما در حین جهت خط قائم تغییر خواهد کرد.

پدیده‌های گوناگون گریز از مرکز را بطور گسترده‌ای در تکنیک بکار می‌برند. مثلاً دستگاه سانتریفوژ (ماشین گریز از مرکز) بر اساس استفاده از این پدیده‌ها ساخته شده است.

سانتریفوژ عبارتست از طبلکی که بسرعت گرد محور خود میچرخد. ببینیم اگر این طبلک را از آب لبریز کرده و اشیاء مختلفی را در آن پرک کنیم چه روی خواهد داد؟

برای پاسخ بدین سئوال ابتدا گویچه‌ای فلزی را در آب میاندازیم. گلوله بسوی ته طبلک میرود ولی نه در خط قائم، بلکه در مسیر خود همواره از محور چرخش دور میشود و جنب جدار طبلک متوقف میگردد. حال گویچه فلزی را با چوب‌پنبه‌ای تعویض میکنیم. ملاحظه میکنیم که این بار برعکس جهت حرکت بسوی محور چر-خش است و گویچه با طی مسیر خود در نزدیکی محور قرار میگیرد.

اگر قطر طبلک سانتریفوژ مورد مثال ما زیاد باشد، ما متوجه میشویم که بمقیاس دوری از مرکز شتاب بشدت افزایش می‌یابد. رویدادهای بالا برای ما کاملاً قابل فهمند. در هنگام چرخش درون سانتریفوژ ثقل اضافی شعاعی ایجاد میشود. در نتیجه اگر سانتریفوژ با سرعتی کافی بچرخد «پائین» آن همان جدار خارجی طبلک میشود. گویچه فلزی «در آب فرو میرود» و چوب‌پنبه‌ای «روی آب بالا میاید». جسم سافط در آب بمقیاس دوری از محور چرخش «سنگین‌تر» میشود.

در سانتریفوژهای از لحاظ فنی کامل سرعت چرخش تا ۶۰ هزار دور در دقیقه یعنی هزار دور در ثانیه میرسد. در فاصله ده سانتیمتری محور چرخش شتاب نیروی ثقل شعاعی تقریباً برابر است با:

$$٤٠ \times ١٠^{٦} \times ٠{,}١ = ٤ \times ١٠^{٦} m/s^{٢}$$

یعنی چهار صد هزار بار بیشتر از شتاب زمین.

واضح است که در این حالت جاذبه زمین را میتوان بحساب نیاورد. از اینرو ما واقعاً محقیم «پائین» سانتریفوژ را جدار طبلک آن بدانیم.

از آنچه گفته شد موارد استفاده از سانتریفوژ را میتوان دریافت. سانتریفوژ وسیله مناسبی است برای جدا کردن ذرات سنگین و سبک مخلوطها از یکدیگر. ما همه اصطلاح «آب گل‌آلود ته نشین شد» را شنیده‌ایم اگر آب گل‌آلود مدت زمانی کافی نگاه داشته شود، گل و لای آن که معمولا سنگین‌تر است رسوب میکند. ولی جریان رسوب ممکن است ماهها ادامه یابد، در صورتیکه بیاری سانتریفوژ مناسبی می‌توان آب را فوراً تمیز ساخت.

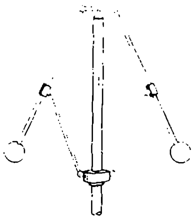
سانتریفوژهائی که با سرعت دهها هزار دور در دقیقه میچرخند قادرند نه تنها آب، بلکه هر مایعی را از کوچکترین ذات مخلوط در آن بزدایند

در صنایع شیمیائی از سانتریفوژها برای جدا ساختن کریستالها از محلولات روياننده آنها، برای آب زدائی نمکها، برای پاکسازی لاکها و در صنایع غذائی برای جدا کردن شکر از شیره قند استفاده میشود.

سانتریفوژهائی را که برای جدا کردن مواد جامد و یا مایع از مقادیر زیادی مایع بکار برده میشوند سپاراتور (جداگر) می‌نامند. مورد استفاده عمده آنها در خامه گیری از شیر است. دستگاههای خامه گیری با سرعت ۲ تا ۶ هزار دور در دقیقه میچرخند و قطر طبلک آنها به ۵ متر میرسد.

در صنایع ذوب فلزات ریخته‌گیری بکمک دستگاه گریز از مرکز وسیعاً مورد استفاده قرار میگیرد. همینکه سرعت قالب چرخنده به ۳۰۰ تا ۵۰۰ دور در دقیقه رسید فلز مذابی که بدرون قالب ریخته شده با نیروی قابل توجهی به جدار خارجی آن جسبانیده میشود. لوله‌های فلزی معمولًا اینطور ریخته میشوند. اینگونه لوله‌ها فشرده‌تر و همگون‌ترند و فاقد ترک و جاهای خالی در جدار خود هستند.

اکنون به نحوه دیگری از کاربرد نیروی گریز از مرکز اشاره میکنیم. در تصویر ۲۵ دستگاه ساده‌ای کشیده شده است که مورد



شکل ۲۵

استعمال آن تنظیم تعداد دور قسمت‌های چرخنده ماشین‌هاست و بنام دستگاه تنظیم کننده گریز از مرکزی خوانده میشود. با افزایش سرعت چرخش، نیروی گریز از مرکز افزایش یافته و فاصله گلوله‌های دستگاه تنظیم از محور بیشتر میشود. در نتیجه میله‌های متصل بگلوله‌ها نیز تغییر موضع میدهند و در حالت معینی طبق محاسبه فنی قبلی قادر به قطع اتصالهای الکتریکی میگردند و یا اینکه مثلا، در مورد ماشینهای بخار، سوپاپ (دریچه) خروج بخار زائد را باز میکنند. در حین این عمل از سرعت چرخش کاسته میشود و میله‌ها دو باره بوضع عادی خود باز میگردند.

اینک به تجربه جالب دیگری دست میزنیم. محور موتور الکتریکی را از حلقه‌ای مقوائی میگذرانیم. کلید برق را وصل کرده و میله چوبی‌را به حلقه مقوائی گردان نزدیک میکنیم. چوب که دارای قطری قابل ملاحظه است بهمان سهولتی که یک اره فولادین این کار را میکند، بوسیله مقوا دونیم میگردد.

استفاده از مقوا بشکل اره دستی برای برش چوب، خنده آورست، پس چرا همین مقوا در حال چرخش سریع چوب‌را می‌برد؟ علتش اینست که نیروی گریز از مرکز عظیمی بر اجزاء مقوا واقع در محیط دایره تاثیر میکند. نیروهای جانبی در مقایسه با نیروهای گریز از مرکز ناچیزند و قادر به خراب کردن سطح مقوا نیستند. حلقه مقوائی با قابلیت حفظ لبه‌های خود توانائی برش چوب را پیدا میکند.

نیروی گریز از مرکزی که در نتیجه گردش زمین بوجود میاید

موجب اختلاف وزن اجسام در عرض‌های مختلف جغرافیائی میشود که در بالا به آن اشاره کردیم.

بدو دلیل وزن اجسام در استوا کمتر از قطب است. اجسام برحسب عرض جغرافیائی منطقه‌ای که در آن قرار گرفته‌اند، از محور زمین دارای فواصل مختلفی هستند. روشن است که از قطب به استوا این فاصله رو بتزاید است. در قطب که استثنائاً بر محور گردش زمین قرار گرفته، شتاب گریز از مرکز $a=۴\pi^{۲}n^{۲}R$ برابر صفر است (بعلت تساوی R با صفر). بر عکس در منطقه استوا این شتاب حد اکثر است. چون نیروی گریز از مرکز نیروی جاذبه را کاهش میدهد، در منطقه استوا فشار جسم بر پایه خود (وزن جسم) حد اقل است.

اگر زمین دقیقاً کره‌ای شکل بود وزنه یک کیلوگرمی ضمن حمل از قطب به استوا ۳٫۵ گرم سبکتر میشد. شما بسادگی می‌توانید این رقم را با گذاشتن $n=۱$ دور در شبانه روز، $R=۶۴۰۰$ کیلومتر و $m=۱۰۰۰$ گرم در فرمول

$$۴\pi^{۲}n^{۲}Rm$$

پیدا کنید. فقط بخاطر داشته باشید که واحدهای اندازه‌گیری را باید به ثانیه و سانتیمتر برگردانید.

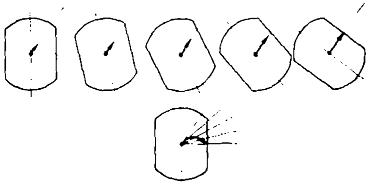
ولی در عمل وزنه یک کیلوگرمی نه ۳٫۵ گرم بلکه ۵٫۳ گرم از وزن خود را از دست میدهد، زیرا زمین مانند کره پهن شده‌ای است که در هندسه بنام بیضوی معروف است. فاصله قطب تا مرکز زمین، از شعاع زمین در استوا تقریباً باندازه ۱/۳۰۰ کمتر است.

سبب این فشردگی کره زمین همان نیروی گریز از مرکز است که بر تمام اجزاء آن اثر میکند. در ازمنه دیرین نیروی گریز از مرکز شکل کره زمین را ریخت و بدان صورت پهن شدگی داد.

نیروی کریولیس

خود ویژگی دنیای سیستم‌های چرخنده تنها با نیروهای ثقل شعاعی خاتمه نمی‌یابد. ما در اینجا خواننده را با اثر جالب دیگری که

5*



شکل ۲۶

تئوری آنرا در سال ۱۸۳۵ میلادی کریولیس فرانسوی آورد آشنا میکنیم.

بدواً این سئوال را در مقابل خود مطرح میکنیم: از دیدگاه آزمایشگاه در حال دوران حرکت مستقیم چگونه بنظر میاید؟ در تصویر ۲۶ طرح این آزمایشگاه ترسیم گشته است. خطی که از مرکز میگذرد مسیر مستقیم جسم مفروض را نشان میدهد. در اینجا آن موردیرا بررسی میکنیم که مسیر حرکت جسم از مرکز چرخش آزمایشگاه عبور میکند. دیسکی که آزمایشگاه بر روی آن قرار گرفته بطور یکنواخت میچرخد. در تصویر پنج حالت آزمایشگاه نسبت به مسیر مستقیم ترسیم گشته است که مواضع متقابل آزمایشگاه و مسیر جسم را در ثانیه‌های یکم، دوم، سوم و الخ نمایش میدهد. چنانکه ملاحظه میکنید، آزمایشگاه در جهت عکس حرکت عقربه ساعت در چرخش است در صورتیکه از بالا به آن نگاه شود.

در امتداد مسیر پیکانهائی کشیده شده‌اند که بترتیب مسافت پیموده شده بوسیله جسم در مدتهای یک، دو، سه ثانیه و غیره را نشان میدهند. در هر ثانیه جسم مسافت یکسانی را طی میکند، چونکه صحبت از حرکت یکنواخت و مستقیم در میان ا ـ (از دیدگاه ناظر نامتحرک).

فرض کنید جسم متحرک گویی است تازه رنگ شده که بر روی دیسک میغلطد. چه ردی بر دیسک خواهد ماند؟ پاسخ این سئوال در تصویر بصورت ترسیمی داده شده است. در آنجا نقاط انتهائی پیکانها

در حالات پنجگانه، بر روی یک طرح منتقل شده‌اند. کافیست که ما این نقاط را با منحنی همواری بهم وصل کنیم. شکل منحنی منتجه هیچ شگفت‌آور نیست، زیرا از دیدگاه ناظر در حال چرخش، حرکت یکنواخت و مستقیم شکل منحنی بخود میگیرد. اصلی که در اینجا در خور توجه است اینست که جسم متحرک در سر تا سر مسیر خود، بجانب راست سمت حرکت متمایل میشود. فرض کنیم دیسک همسو با حرکت عقربه ساعت بچرخد. تکرار ترسیم را بعهده خواننده میگذاریم. در این حالت جسم متحرک از دیدگاه ناظر چرخنده بجانب چپ سمت حرکت منحرف خواهد شد.

ما میدانیم که در سیستم‌های چرخنده نیروی گریز از مرکز بوجود میاید، ولی تأثیر این نیرو نمی‌تواند دلیل انحنای مسیر باشد، چونکه این نیرو در امتداد شعاع عمل میکند. لذا در سیستم‌های چرخنده بغیر از نیروی گریز از مرکز نیروی اضافی دیگری هم ایجاد میشود که آنرا نیروی کریولیس میخوانند

چرا در مثالهای پیشین ما با نیروی کریولیس برخورد نمیکردیم و تنها با اکتفا به نیروی گریز از مرکز بررسی خود را ادامه میدادیم؟ علت این امر در اینست که ما تا کنون حرکت اجسام را از دیدگاه ناظر در حال چرخش مطرح نساخته بودیم. نیروی کریولیس بویژه تنها در این مورد پدیدار میشود. بر اجسام ساکن واقع در سیستم‌های چرخنده، تنها نیروی گریز از مرکز تاثیر میکند. مثلاً، بر میزی که به کف آزمایشگاه چرخنده‌ای با پیچ نصب شده است فقط نیروی گریز از مرکز اثر میگذارد، در حالیکه بر توپی که از همین میز پائین افتاده و در کف آزمایشگاه میغلطد علاوه بر نیروی گریز از مرکز نیروی کریولیس نیز موثر خواهد بود.

کمیت نیروی کریولیس تابع چه مقادیری است. اینرا میتوان محاسبه کرد، ولی محاسبه مفصل‌تر از آنست که بتوان آنرا در اینجا آورد. از اینرو به شرح نتیجه محاسبات اکتفا میکنیم.

بر خلاف نیروی گریز از مرکز که اندازه آن با فاصله از محور چرخش بستگی دارد، نیروی کریولیس رابطه‌ای با موضع جسم ندارد. کمیت آنرا سرعت حرکت جسم و یا دقیقتر بگوئیم اندازه سرعت و جهت آن نسبت به محور چرخش تعیین میکند. اگر جسم در امتداد محور

6—1300

چرخش حرکت کند نیروی کریولیس مساوی صفر خواهد بود. هر چه زاویه بین بردار سرعت و محور چرخش بزرگتر باشد بهمان اندازه نیروی کریولیس نیز بیشتر است. هنگامی که حرکت جسم عمود بر محور چرخش باشد این نیرو بحد اکثر میرسد.

بطوریکه میدانیم بردار سرعت را همیشه میتوان به مؤلفه‌های آن تجزیه کرد و از این راه دو حرکتی را که در آن واحد جسم در آنها شرکت دارد جداگانه مورد مطالعه قرار داد.

اگر سرعت جسم را به مؤلفه‌های v_1 و $v_{\parallel}$ که بترتیب موازی و عمود بر محور چرخش هستند تجزیه کنیم، حرکت موازی محور فارغ از تاثیر نیروی کریولیس است و کمیت نیروی کریولیس F_k را تنها مؤلفه v_1 تعیین میکند. محاسبات به فرمول زیر منتج میشوند:

$$F_k = 4\pi n v_1 m$$

در اینجا m جرم جسم و n تعداد دوری است که سیستم چرخنده در واحد زمان انجام میدهد. چنانکه از فرمول برمیاید، هرچه سرعت چرخش سیستم بیشتر و حرکت جسم سریعتر باشد نیروی کریولیس بیشتر خواهد بود.

جهت نیروی کریولیس نیز از طریق محاسبه معلوم میشود. این نیرو همیشه عمود بر محور چرخش و سمت حرکت می‌باشد. ضمناً چنانکه در بالا ذکر شد، در سیستمی که عکس جهت حرکت عقربه ساعت میچرخد نیروی کریولیس در جهت راست سمت حرکت است.

توضیح بسیاری از پدیده‌های جالبی را که در روی زمین رخ میدهند باید در تأثیر نیروی کریولیس جستجو کرد. زمین به شکل کره است نه دیسک بنا بر این مظاهر نیروهای کریولیس در آن بغرنج‌تر است. این نیروها در موقع حرکت بر سطح زمین و هنگام سقوط اجسام بر آن ظاهر میشوند.

آیا جسم در مسیری درست قائم سقوط میکند؟ نه. تنها در قطب است که جسم دقیقاً بطور قائم سقوط میکند، چون جهت حرکت و محور چرخش زمین با یکدیگر انطباق می‌یابند و نتیجتاً نیروی کریولیس وجود ندارد. در استوا وضع دیگری است. در آنجا جهت حرکت با محور زمین زاویه قائمه تشکیل میدهد. اگر از قطب شمال بنگریم برای ما جهت حرکت کره زمین عکس سمت حرکت عقربه ساعت

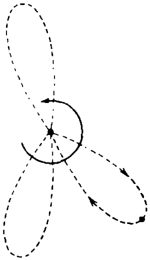
خواهد بود، لذا جسم در حال سقوط آزاد، باید براست جهت حرکت یعنی به سمت خاور منحرف شود. کمیت انحراف بخاور در منطقه استوا حد اکثر است و با نزدیک شدن به قطب میزان آن تا صفر کاهش می‌یابد.

ما در اینجا میزان انحراف در روی خط استوا را مورد محاسبه قرار میدهیم. از آنجا که در حالت سقوط آزاد، جسم با شتابی یکنواخت در حرکت است، نیروی کریولیس با نزدیک شدن جسم بزمین افزایش می‌یابد. روی این اصل ما به محاسبه‌ای تقریبی اکتفا میکنیم. اگر مثلاً جسم از ارتفاع ۸۰ متر سقوط کند، مدت سقوط در حدود ۴ ثانیه خواهد بود (بر طبق فرمول $t=\sqrt{\frac{2h}{g}}$). سرعت متوسط در جریان سقوط برابر ۲۰ m/s است.

این اندازه سرعت را ما در فرمول شتاب کریولیس — $4\pi nv$ میگذاریم. مقدار n برابر یک دور در شبانه‌روز را به تعداد دور در ثانیه برمیگردانیم. ۲۴ ساعت برابر است با ۸۶۴۰۰ = ۳۶۰۰ × ۲۴ ثانیه، بنابر این n مساوی $\frac{1}{86400}$ دور در ثانیه است و در نتیجه شتابی که نیروی کریولیس ایجاد میکند معادل $\frac{\pi}{1080}$ m/s² خواهد بود. مسافتی که در طی ۴ ثانیه با این شتاب پیموده میشود برابر است با $\frac{1}{2}\times\frac{\pi}{1080}\times 4^2=2{,}3$ سانتیمتر. این همان اندازه انحراف بخاور در مثال ماست. با محاسبه دقیق مسئله که عدم یکنواختی سقوط را در نظر میگیرد رقم دیگری یعنی ۳/۱ سانتیمتر بدست میآید.

اگر ضمن سقوط آزاد، انحراف مسیر جسم از خط قائم در استوا حد اکثر و در قطب برابر صفر است، در مورد حرکت در سطح افقی تاثیر نیروی کریولیس منجر بعکس این قضیه میشود.

محوطه افقی واقع در قطب شمال و یا جنوب هیچگونه تفاوتی با دیسک چرخنده‌ای که ما بررسی خود را از آن آغاز کردیم، ندارد. جسمی که در این محوطه بحرکت مشغول است، تحت تاثیر نیروی کریولیس در قطب شمال به راست و در قطب جنوب بچپ سمت حرکت خود منحرف خواهد شد.



شکل ۲۷

خواننده‌می تواند، با استفاده از فرمول شتاب کریولیس، بسهولت حساب کند که گلوله‌ایکه از لوله تفنگ با سرعت اولیه ۵۰۰ متر در ثانیه خارج میشود، پس از گذشت یک ثانیه (یعنی در مسافت ۵۰۰ متری) در سطح افقی باندازه ۳٫۵ سانتیمتر از هدف انحراف پیدا میکند.

چرا در خط استوا انحراف در سطح افقی باید مساوی صفر باشد؟ بدون آوردن براهین قاطع نیز مفهوم است که باید همین طور باشد. انحراف در قطب شمال براست و در قطب جنوب بچپ است. لذا در میانه راه بین دو قطب که همان خط استوا باشد اندازه آن برابر صفر است.

آزمایش با آونگ فوکورا بخاطر بیاوریم. از دیدگاه ناظر ستاره‌ای، آونگی که در قطب در حال نوسان است صفحه نوسان خود را حفظ میکند و کره زمین با چرخش خود از زیر آونگ دور میشود، اما دیده‌بانی که همراه کره زمین در حال چرخش است این آزمایش را با نیروی کریولیس توضیح خواهد داد. در واقع، نیروی کریولیس عمود بر محور زمین و سمت حرکت آونگ است. بعبارت دیگر، نیروی کریولیس عمود بر صفحه نوسان آونگ بوده و این صفحه‌را دائما میچرخاند. اگر کاری کنیم که انتهای آونگ مسیر حرکت خود را ترسیم کند، خواهیم دید که این مسیر بشکلی است که در تصویر ۲۷ نشان داده شده است. در این تصویر یک پریود و نیم نوسان آونگ مصادف است با یکچهارم گردش «زمین» بدور خود. آونگ فوکودارای چرخشی بس کندتر است. در قطب صفحه نوسان آونگ طی یک دقیقه باندازه ۱/۴ درجه میچرخد. در قطب شمال چرخش براست سمت حرکت و در قطب جنوب بچپ انجام میگیرد.

در عرض جغرافیائی اروپای مرکزی در مقایسه با استوا تاثیر کریولیس تا حدی کمتر است. در اینجا گلوله تفنگ مورد بحث در مثال بالا، بجای ۳٫۵ سانتیمتر ۲٫۵ سانتیمتر منحرف میشود و آونگ فوکو در عرض یک دقیقه باندازه ۱/۶ درجه چرخش پیدا میکند.

آیا توپچی‌ها باید نیروی کریولیس را بحساب آورند؟ توپ «برتا»

که آلمانها در زمان جنگ جهانی اول با آن پاریس را بتوپ بستند در مسافت ۱۱۰ کیلومتری هدف قرار گرفته بود. انحراف کریولیس در این مورد به ۱۶۰۰ متر میرسد. و این دیگر مقدار کمی نیست.

اگر گلوله توپی بدون در نظر گرفتن نیروی کریولیس به مسافتی دور پرتاب شود، باندازه قابل توجهی از هدف خود منحرف خواهد شد. بزرگی این تاثیر نه بخاطر زیادی نیروی کریولیس است (برای گلوله ۱۰ تنی دارای سرعت ۱۰۰۰ کیلومتر در ساعت نیروی کریولیس تقریباً معادل ۰٫۵ کیلوگرم خواهد بود)، بلکه اثر اینروست که تاثیر این نیرو مداوم و طولانی است.

البته تاثیر باد بر گلوله هدایت نشونده ممکن است از مثال بالا کم اهمیت‌تر نباشد. اصلاح مسیر که بوسیله خلبان در انجام میگیرد، معلول تاثیر نیروهای باد و کریولیس و همچنین کامل نبودن هواپیما یا مرمی پرنده می‌باشد.

باستثنای هوانوردان و توپچی‌ها کارشناسان چه رشته‌هائی باید به اثر کریولیس توجه داشته باشند؟ حتماً متعجب خواهید شد اگر بگوئیم که متخصصین راه آهن را نیز باید در این جرگه محسوب داشت. در خطوط آهن تحت تاثیر نیروی کریولیس یکی از دو ریل از داخل بیشتر از دیگری سائیده میشود. اکنون دیگر برای ما روشن است کدام ریل. در نیمکره شمالی ریل سمت راست (نسبت به جهت حرکت) و در نیمکره جنوبی ریل سمت چپ. تنها کارکنان راه‌آهن مناطق استوائی از این لحاظ درد سری ندارند.

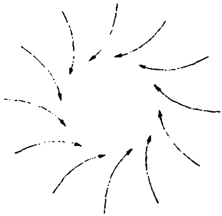
تخریب سواحل چپ رودخانه‌ها بوسیله جریان آب در نیمکره شمالی را نیز میتوان درست مثل سایش ریلها توضیح داد. انحراف مصب رودخانه‌ها با نیروی کریولیس ارتباط زیادی دارد. بقرار معلوم رودخانه‌های نیمکره شمالی موانع را از طرف راست دور میزنند.

بطوریکه اطلاع داریم جریانات جوی روانه منطقه‌ای میشوند که در آنجا فشار کمتر باشد. ولی چرا اینگونه بادهارا سیکلون میخوانند؟ آخر ریشه واژه‌ای این لغت اشاره‌ای است به حرکت دورانی (سیکلی).

همین طور هم هست — در منطقه‌ای که فشار کمتر است، حرکت دورانی توده‌های هوا بوجود میاید (تصویر ۲۸). علت این



شکل ۲۹



شکل ۲۸

امر را باید در تاثیر نیروی کریولیس جستجو کرد. در نیمکره شمالی انبوهی هوا که بسوی منطقه کم‌فشار تر هجوم میاوردند براست سمت حرکت خود منحرف میشوند. به تصویر ۲۹ نگاه کنید، خواهید دید که این امر موجب انحراف بادهائی که در دو نیمکره از مناطق گرمسیر به استوا میوزند (بادهای دائمی) بسوی باختر میگردد.

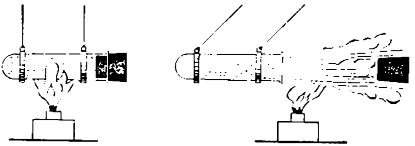
از چه رو نیروئی چنان کوچک نقشی بدین بزرگی در حرکت توده های هوا ایفا میکند؟

علتش ناچیزی نیروهای اصطکاک است. هوا بآسانی بحرکت درمیاید، از اینرو نیروئی کم ولی دارای تاثیر مداوم پی‌آمدهای مهمی را ببار میآورد.

بازده

حتی کسانی هم که در جنگ شرکت نکرده‌اند میدانند که در موقع تیراندازی با توپ لوله آن بشدت عقب میزند و تفنگ ضمن تیراندازی به شانه تیرانداز لگد میزند. اما با پدیده بازده بدون توسل به اسلحه گرم نیز میتوان آشنا شد. در لوله آزمایشی آب بریزید، در آنرا با چوب پنبه ببندید و لوله آزمایش را چنانکه در تصویر ۳۰ نشان داده شده است با دو نخ بطور افقی آویزان کنید. پس از این کار شعله چراغ را به جدار شیشه‌ای لوله آزمایش نزدیک کنید. آب بتدریج شروع بجوشیدن میکند و تقریبا در عرض دو دقیقه چوب‌پنبه با صدا به یک طرف بیرون پریده و لوله آزمایش بسمت مقابل آن کج میشود.

نیروئی که چوب‌پنبه را از لوله آزمایش به بیرون پرتاب میکند فشار بخار است. و نیروئی که لوله آزمایش را کج میکند باز همان فشار بخار است. هر دو حرکت تحت تاثیر یک نیرو بوجود آمدند.



شکل ۳۰

در مورد تیراندازی نیز همین حالت رخ میدهد با این تفاوت که بجای فشار بخار فشار گاز باروت تاثیر میکند.

پدیده بازده نتیجه جبری اصل برابری کنش و واکنش میباشد. اگر بخار بر چوب پنبه تاثیر میکند چوب‌پنبه هم در جهت عکس آن روی بخار اثر می‌بخشد و بخار این واکنش را به لوله آزمایش انتقال میدهد.

ممکنست چنین اعتراضی بفکرتان برسد که آیا یک نیرو قادر است در آن واحد پی‌آمدهائی چنین متفاوت ببار آورد؟ تفنگ تنها اندکی به عقب میرود، در حالیکه گلوله دور می‌پرد. ولی ما امیدواریم که چنین اعتراضی بفکر خواننده خطور نکرده باشد. البته نیروهای یکسان می‌توانند نتایج گوناگونی به بار آورند، چونکه شتاب مکتسبه بوسیله جسم (این خود نتیجه تاثیر نیروست) با جرم آن تناسب معکوس دارد. شتاب یکی از اجسام (گلوله توپ، گلوله تفنگ، چوب‌پنبه) را باید اینطور بنویسیم $a_1=\frac{F}{m_1}$ و شتاب جسم که دیگر تحت تاثیر بازده قرار گرفته است (توپ،، تفنگ، لوله آزمایش) $a_2=\frac{F}{m_2}$ خواهد بود. از آنجا که نیرو در هر دو فرمول یکی است این نتیجه مهم حاصل میشود که شتابهای حاصله بهنگام تاثیر متقابل دو جسمی که در تیراندازی شرکت میکنند با اجرام آنها تناسب معکوس دارد.

$$\frac{a_1}{a_2}=\frac{m_2}{m_1}$$

این بدانمعنی است که شتابی که توپ در حین عقب زدن کسب میکند بتعداد مراتبی که توپ از گلوله خود سنگین‌تر است، کمتر از شتاب گلوله خواهد بود.

شتاب گلوله و شتاب تفنگ که بصورت لگد زدن ظاهر میشود تا زمانی که گلوله در لوله تفنگ حرکت میکند ادامه دارد. این فاصله زمانی را با حرف t علامت میگذاریم. با گذشت این زمان حرکت یکنواخت جای حرکت شتابدار را میگیرد. برای تسهیل مطلب، فرض میکنیم که شتاب ثابت میماند. در آنصورت سرعتی که با آن گلوله از لوله تفنگ خارج میشود مساوی $v_1=a_1t$ خواهد بود و سرعت

لگدزنی تفنگ $v_2 = a_2 t$. از آنجا که زمان تاثیر شتاب مساوی است بدین نتیجه میرسیم که

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{a_1}{a_2}$$

است، و بنابر این

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{m_2}{m_1}$$

سرعت‌هائی که اجسام پس از تاثیر متقابل پیدا میکنند با جرم آنها دارای نسبت معکوس میباشند.

با در نظر گرفتن خصلت برداری سرعت، نسبت اخیر را میتوان اینگونه بازنوشت: $m_1 v_1 = - m_2 v_2$. علامت منفی حاکی از ناهمسو بودن سرعت‌های v_1 و v_2 می‌باشد.

در پایان بار دیگر تساوی را بشکلی باز می‌نویسیم که هر دو حاصلضرب جرم در سرعت در یک طرف آن قرار گیرند:

$$m_1 \mathbf{v}_1 + m_2 \mathbf{v}_2 = 0$$

قانون بقای مقدار حرکت

حاصلضرب جرم و سرعت هر جسمی را مقدار حرکت آن جسم می‌خوانند. از آنجا که سرعت بردار است مقدار حرکت نیز کمیتی است برداری و این دو با یکدیگر همسو می‌باشد.

بیاری این مفهوم جدید قانون نیوتن $F = ma$ را میتوان بصورتی دیگر نوشت از آنجا که $a = \frac{v_2 - v_1}{t}$ است $F = \frac{mv_2 - mv_1}{t}$ و یا $Ft = mv_2 - mv_1$ می‌گردد حاصلضرب نیرو در زمان تاثیر آن برابر است با تغییر مقدار حرکت جسم.

اینک به پدیده بازده برسیگردیم.

نتیجه بررسی بازده توپ را اکنون دیگر می‌توان مختصرتر فرمولبندی کرد: مجموع مقادیر حرکت توپ و گلوله پس از تیراندازی مساوی صفر

باقی میماند. روشن است که قبل از شلیک، یعنی آنگاه که توپ و گلوله در حالت سکون قرار داشتند نیز جمع مقادیر حرکت آنها برابر صفر بود.

سرعتهائی که در معادله $m_1v_1 + m_2v_2 = 0$ آورده شده‌اند همان سرعتهای بلاواسطه پس از شلیک هستند. در جریان حرکت گلوله و توپ، نیروی ثقل و مقاومت هوا شروع به تاثیر بر آنها میکنند. نیروی اصطکاکی که در نتیجه حرکت توپ بر روی زمین بوجود میاید نیز مضافاً بر آن اثر میگذارد. در صورتیکه تیراندازی در فضای فاقد هوا و از توپی معلق در خلاء عملی میگردید، حرکت توپ و گلوله با سرعتهای v_1 و v_2 باندازه دلخواه می‌توانست ادامه یابد. توپ در جهتی و گلوله در سمت مخالف آن براه میافتادند.

در تجربه توپخانه معاصر از توپهای مستقر بر روی سکوها که قادر به تیراندازی در حین حرکت میباشد وسیعاً استفاده میشود. برای اینکه معادله حاصله را در مورد تیراندازی از چنین توپی بکار برد، چه تغییراتی باید در آن داد؟ ما می‌توانیم اینطور بنویسیم:

$$m_1u_1 + m_2u_2 = 0$$

در اینجا u_1 و u_2 بترتیب سرعتهای گلوله و توپ نسبت به سکوی متحرک می‌باشند. اگر سرعت سکو را بوسیله V نشان دهیم، سرعتهای توپ و گلوله نسبت به ناظر بیحرکت برابر

$$v_2 = u_2 + V \quad \text{و} \quad v_1 = u_1 + V$$

خواهند بود. مقادیر u_1 و u_2 را در معادله اخیر میگذاریم. در نتیجه تساوی زیر حاصل میشود:

$$(m_1 + m_2)V = m_1v_1 + m_2v_2$$

طرف راست تساوی از حاصل جمع مقادیر حرکت گلوله و توپ بعد از تیراندازی تشکیل یافته است. اما طرف چپ چطور؟ تا قبل از تیراندازی، توپ و گلوله که جرم مشترکشان $m_1 + m_2$ است. با سرعت V در حرکت بودند. یعنی طرف چپ تساوی را نیز مقدار حرکت مشترک توپ و گلوله در زمان قبل از تیراندازی تشکیل میدهد.

بدین ترتیب ما یک قانون بسیار مهم طبیعت را باثبات رساندیم که بنام قانون بقای مقدار حرکت معروف است. ما این قانون را برای دو جسم ثابت کردیم، اما بآسانی می‌توان نشان داد، که نتیجه برای هر تعداد دلخواهی از اجسام نیز صادق است. مضمون این قانون چیست؟ قانون بقای مقدار حرکت حاکی از اینست که مجموع مقادیر حرکت چند جسم که بر روی یکدیگر متقابلاً تاثیر میکنند، در نتیجه این تاثیر متقابل تغییر نمی‌پذیرد.

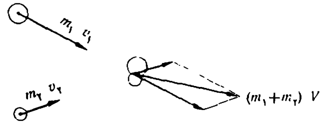
بدیهی است که قانون بقای مقدار حرکت تنها زمانی صادق است که بر گروه اجسام مورد نظر هیچ نیروئی از خارج تاثیر نکند. این گروه اجسام را در فیزیک گروه مسدود می‌خوانند.

تفنگ و گلوله در موقع تیرندازی علیرغم تاثیر نیروی جاذبه زمین بر آنها گروه مسدودی مرکب از دو جسم را تشکیل میدهند. وزن گلوله در مقایسه با نیروی گازهای باروت کم است، و پدیده بازده مستقل از محل تیراندازی — خواه روی زمین باشد و یا در موشک سیاره‌پیما، بر طبق قوانین یکسانی عمل میکند.

قانون بقای مقدار حرکت حل مسائل گوناگون مربوط به تصادم اجسام را بسهولت ممکن میسازد. امتحان کنید با گویی گلین گوی دیگری را مورد اصابت قرار دهید. آنها هر دو بیکدیگر چسبیده و باهم بحرکت خود ادامه میدهند. اگر با تفنگ به گوی چوبینی تیر خالی کنیم، گوی همراه با گلوله‌ای که در آن گیر کرده است بغلطش در خواهد آمد. اگر کسی با دور خیز بدرون واگنت پرد واگنت ساکن بحرکت در خواهد آمد. تمام مثال‌هائی که در بالا آورده شدند از دیدگاه یک فیزیک‌دان با یکدیگر مشابه‌اند. قاعده‌ای که بدین نحو سرعت‌های اجسام متصادم را بهم مربوط میسازد، مستقیما از قانون بقای مقدار حرکت بدست میآید.

مقادیر حرکت اجسام تا قبل از برخورد آنها با یکدیگر مساوی m_1v_1 و m_2v_2 بودند. پس از بر خورد اجسام بهم پیوستند و جرم کل آنها برابر m_1+m_2 شد.

در صورتیکه سرعت اجسام بهم پیوسته را بوسیله V نشان دهیم فرمول زیر بدست میاید.



شکل ۳۱

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2)\,V$$

$$V = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

در اینجا با در نظر گرفتن خصلت برداری قانون بقای مقدار حرکت، متذکر میشویم که مقادیر حرکت mv در صورت فرمول بالا را باید مانند دو بردار باهم جمع کرد.

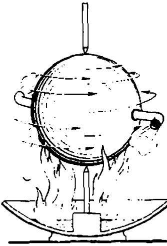
در تصویر ۳۱ ضربه «متحدکننده» دو جسم که ضمن حرکت، تحت زاویه‌ای با یکدیگر برخورد میکنند نشان داده شده است. برای یافتن اندازه سرعت باید طول قطر متوازی الاضلاعی را که بوسیله بردارهای مقدار حرکت اجسام متصادم ساخته میشود بر مجموع اجرام آنها تقسیم کرد.

حرکت واکنشی

انسان با تکیه بر روی زمین از جا کنده شده و حرکت میکند؛ قایق از اینرو قادر به پیشروی در مسیر خود میشود که پاروزنان با پارو به آب تکیه کرده و آنرا جلو میرانند. کشتی موتوری نیز با اتکاء بر روی آب حرکت میکند، منتهی نه بوسیله پارو، بلکه با پروانه‌های خود. حرکت قطار بر روی ریلها نیز بر اساس اتکاء بر سطح زمین انجام میگیرد. بخاطر بیاورید در هنگام یخبندان اتوبیل با چه اشکالی از جا کنده میشود.

از مجموع این گفته‌ها میشود استنباط نمود که تکیه بر سطح اتکائی برای کنده شدن از جا شرط لازم حرکت است. حتی هواپیما نیز با اتکاء پروانه خود بر هوا به جلو حرکت میکند.

ولی آیا واقعاً این شرطی است لازم؟ آیا شیوه مبدعانه‌ای برای حرکت بدون اتکاء بر چیزی موجود نیست؟ اگر شما با کفش پاتیناژ روی یخ سر خورده باشید، بسهولت می‌توانید از روی تجربه خویش متقاعد شوید که چنین حرکتی کاملاً امکان‌پذیر است. چوبدست سنگینی بدست بگیرید و روی یخ بایستید چوبدست را بجلو پرت کنید، در اینحالت چه روی خواهد داد؟ شما حتما بعقب سر خواهید خورد، صرفنظر از اینکه بهیچوجه قصد حرکت روی یخ با تکیه بر روی پاها را نداشته اید.



شکل ۳۲

پدیده بازده که ما آنرا مورد بررسی قرار دادیم، کلید عملی ساختن حرکت بدون اتکاء را بدست میدهد. بازده امکان میدهد که در فضای بدون هوا، یعنی در جائی هم که دیگر بطور قطع چیزی برای متکی شدن بدان موجود نیست، حرکت را با شتاب توام ساخت. از روزگاران دیرین برای ساختن بازیچه‌های جالب از بازده ناشی از خروج جریان بخار (واکنش جریان) استفاده میشد. در تصویر ۳۲ قدیمترین توربین بخاری که در قرن دوم قبل از میلاد اختراع شده بود نشان داده میشود. دیگ کروی بر روی محور قائم قرار گرفته است بخار ضمن خروج از لوله‌های زانوئی شکل دیگ متکی بر محور عمودی، این لوله‌ها را بجهت عکس جریان خود هل میدهد و کره را بحرکت درمیاورد.

در زمان ما استفاده از حرکت واکنشی دیگر از حیطه بازیچه‌سازی و گردآوری مشاهدات سرگرم کننده بسیار فاصله گرفته است. قرن بیستم را گاهی سده انرژی اتمی می‌نامند، ولی با دلایلی که کم اهمیت تر هم نیستند، این سده را میتوان قرن حرکت واکنشی نامید، چونکه ارج واقعی پی آمدهای دور حاصله از کار برد موتورهای نیرومند واکنشی را بزحمت می‌توان ارزیابی کرد. استفاده از این تکنیک

نه تنها تحول بزرگی در صنعت هواپیماسازی ایجاد کرد، بلکه سر آغاز نزدیکی و آشنائی انسان با کیهان شد.

اصل حرکت واکنشی اجازه داد هواپیماهائی با سرعت چندین هزار کیلومتر در ساعت، دستگاه‌های پرنده با سقف پرواز صدها کیلومتر، ماهواره‌های مصنوعی زمین و موشک‌های فضائی که بمسافرت بین سیارات می‌پردازند، ساخته شوند.

محرک واکنشی (موتور جت) ماشینی است که گازهای حاصله از احتراق سوخت با نیروئی زیاد از آن خارج میشوند. موشک در سمت مقابل خروج این گازها بحرکت در میاید.

نیروی کششی که موشک را در فضا می‌برد مساوی با چیست؟ ما میدانیم که نیرو برابر است با تغییر مقدار حرکت در واحد زمان. بر طبق قانون بقاء در مقدار حرکت موشک باندازه مقدار حرکت mv گاز خارج شده دگرگونی ایجاد میشود.

این قانون طبیعت امکان میدهد که مثلا، ارتباط بین نیروی کشش واکنشی و مقدار سوخت لازم برای آن محاسبه شود. برای این کار باید سرعت خروج گازهای حاصله از احتراق را دانست. مثلا در صورتیکه سرعت خروج گاز ۲۰۰۰ متر در ثانیه و مقدار آن ۱۰ تن در ثانیه باشد، نیروی کشش تقریباً مساوی ۲×۱۰^{۱۲} دین یعنی ۲۰۰۰ تن میشود که مقداری است قابل توجه.

حال به تعیین میزان تغییر سرعت موشکی که در فضای بین سیارات در حرکت است می‌پردازیم.

چنانکه میدانیم مقدار حرکت گازی که جرم آن مساوی ΔM بوده و با سرعتی برابر u خارج میشود، برابر $u \times \Delta M$ میباشد. در این ضمن مقدار حرکت موشک دارای جرم M، باندازه $M \times \Delta v$ افزایش حاصل میکند. بر طبق قانون بقای مقدار حرکت این دو کمیت با یکدیگر برابرند.

$u \times \Delta M = M \times \Delta v$ است، پس $\Delta v = u \times \frac{\Delta M}{M}$ می باشد.

اما اگر بخواهیم سرعت موشک را در جریان خروج اجرامی که با جرم موشک قابل مقایسه است محاسبه کنیم، فرمول بدست آمده در

فوق قابل استفاده نخواهد بود، چون این فرمول جرم موشک را ثابت فرض میکند. ولی این نتیجه مهم به قوت خود باقی میماند که در صورت تغییرات نسبی جرم بمقدار یکسان، بر سرعت نیز بیک اندازه افزوده میشود. محاسبه از روی فرمول دقیق نشان میدهد، در صورتیکه جرم موشک دو بار کاهش یابد سرعت آن به u ۰٫۷ میرسد.

برای رساندن سرعت موشک به u ۳ باید جرمی باندازه $m=\frac{۱۹}{۲۰}M$ را سوزاند. این بدانمعنی است که در صورت تمایل به حصول سرعتی تا u ۳ یعنی ۶ الی ۸ km/s، تنها ۱/۲۰ جرم موشک را میتوان محفوظ نگاه داشت.

برای نیل به سرعت u ۷ جرم موشک در مدت سرعت‌گیری باید هزار بار کاهش یابد. این محاسبات ما را از تلاش در راه افزایش جرم ماده سوختی که میشود در موشک با خود بر داشت، بر حذر میدارند. هر چه بیشتر سوخت با خود برداریم، مقدار بیشتری از آنرا باید بسوزانیم. با در نظر گرفتن سرعت امروزی خروج گاز، خیلی بسختی میتوان به افزایش سرعت موشک نائل آمد.

مسئله عمده، در راه نیل به سرعت‌های زیاد موشک عبارتست از افزایش سرعت خروج گاز. در ارتباط با این امر، استفاده از موتورهائی که با سوخت جدید، یعنی سوخت هسته‌ای، کار میکنند نقش مهمی را بعهده خواهد داشت.

در صورت بی تغییر ماندن سرعت خروج گاز ها برای تامین سرعت، بفرض ثابت نگاه داشتن جرم سوخت، کاربرد موشک‌های چند طبقه‌ای سودمند است. در موشک یک طبقه‌ای جرم سوخت کاهش میبابد، ولی مخازن تهی شده سوخت بحرکت خود همراه موشک ادامه میدهند و برای شتاب بخشیدن به آنها انرژی اضافی مورد نیاز است. از اینرو صلاح در اینست که پس از مصرف سوخت مخازن تهی شده بدور انداخته شوند. در موشکهای چند طبقه‌ای معاصر نه تنها مخازن سوخت و لوله‌های اتصالی، بلکه موتور طبقه‌ای که کار خود را انجام داده است نیز بدور انداخته میشود.

بدیهی است بهتر از همه اینست که جرم غیر لازم موشک پی‌درپی بدور انداخته شود. تا کنون چنین مدلی وجود ندارد. وزن

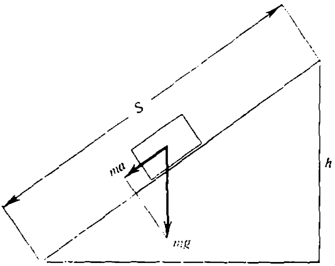
6*

یک موشک سه‌طبقه، در حین پرتاب میتواند از وزن اولیه موشک یک طبقه‌ای که دارای سقف پرواز مشابهی است ٦ بار کمتر باشد. موشک «پی در پی» از این نظر ١٥ درصد از موشک سه طبقه‌ای سودمندتر است.

حرکت تحت تاثیر نیروی ثقل

دو ارابه کوچک را از دو سطح شیب‌دار بسیار صاف به پائین رها میکنیم. یکی از تخته‌ها باندازه قابل توجهی کوتاه‌تر از دیگری انتخاب شده است و هر دو بر روی تکیه گه واحدی قرار داده شده‌اند. چون نقاط فوقانی هر دو تخته که مبداء حرکت ارابه‌هاست در یک سطح واقع شده‌اند، شیب یکی از سطوح تندتر از دیگری خواهد بود. بنظر شما کدامیک از ارابه‌ها سرعت بیشتری کسب خواهد کرد؟ معمولا خیال میکنند که سرعت در سطح دارای شیب تندتر بیشتر است.

تجربه نشان میدهد که این نظر اشتباه است و هر دو ارابه دارای سرعتهای مساوی خواهند بود. تا زمانیکه جسم بر روی سطح شیب‌دار در حرکت است، تحت تاثیر نیروئی ثابت که همان مؤلفه نیروی ثقل در امتداد حرکت است قرار دارد. بطوریکه میدانیم،



شکل ٣٢

سرعت v که جسم در حال حرکت در مسیر S با شتاب a کسب میکند مساوی است با $\sqrt{2aS}$.

از کجا پیداست که کمیت سرعت ربطی به زاویه شیب ندارد؟ در شکل ۳۲ ما دو مثلث مشاهده میکنیم. یکی از آنها سطح شیب‌دار را نشان میدهد. ضلع کوچکتر مجاور زاویه قائمه این مثلث که با حرف h علامت گذاری شده است ارتفاع مبداء حرکت را مشخص میسازد. وتر S نمودار مسافتی است که جسم با حرکت شتابدار خود طی میکند. مثلث کوچک نیروها با ضلع مجاور ma و وتر mg با مثلث بزرگ متشابه است، زیرا هر دو قائم‌الزاویه‌اند و بعلت عمود بودن اضلاعشان بر یکدیگر زاویه‌های دیگر شان نیز مساوی است. نتیجتا نسبت اضلاع مجاور باید برابر نسبت وترها با یکدیگر باشد، یعنی:

$$aS = gh \quad \text{ویا} \quad \frac{h}{ma} = \frac{S}{mg} \cdot$$

ما ثابت کردیم که حاصلضرب aS و در نتیجه سرعت نهائی جسم در حال نزول از سطح شیب‌دار ارتباطی با زاویه شیب ندارد و تنها به ارتفاع مبدأ حرکت بسته است. سرعت v در تمام سطوح شیب‌دار مساوی $\sqrt{2gh}$ خواهد بود، تنها بشرط اینکه حرکت از ارتفاع واحدی شروع شود. این سرعت برابر سرعت سقوط آزاد از ارتفاع h می‌باشد.

سرعت جسمی را در دو نقطه سطح شیب‌دار، واقع در ارتفاعات h_1 و h_2 اندازه میگیریم. سرعت جسم را در نقطه اولی با v_1 و در نقطه دومی با v_2 نشان میدهیم.

اگر ارتفاع مبداء حرکت h باشد، توان دوم سرعت جسم در اولین نقطه $v_1^2 = 2g(h - h_1)$ و در دومین نقطه $v_2^2 = 2g(h - h_2)$ خواهد بود. با تفریق رابطه اول از دوم، در می‌یابیم که سرعتهای جسم در نقاط آغاز و انتهای هر بخش از سطح شیب‌دار با ارتفاعات این نقاط مربوطند:

$$v_2^2 - v_1^2 = 2g(h_1 - h_2)$$

تفاضل توان دوم سرعتها فقط تابع اختلاف ارتفاعات است. متذکر میشویم که معادله فوق بیک اندازه برای حرکت به بالا و پائین

قابل استفاده است. با این تفاوت که در صورت کمتر بودن ارتفاع نقطه اول از دوم (صعود) سرعت در دومین نقطه کمتر خواهد بود.

این فرمول را می‌توان بشکل زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{v_1^2}{2} + gh_1 = \frac{v_2^2}{2} + gh_2$$

بدینوسیله میخواهیم تأکید کنیم که مجموع نصف توان دوم سرعت و ارتفاع ضرب در g، برای تمام نقاط سطح شیب‌دار یکسان است. لذا می‌توان گفت که کمیت $\frac{v^2}{2} + gh$ در طول حرکت محفوظ میماند.

نکته قابل توجه در اینست که قانون مزبور برای حرکت بدون اصطکاک روی هر تپه و بطور کلی در هر مسیر دارای فراز و نشیب‌های متوالی با درجات مختلف شیب، صدق میکند. این از آنجا ناشی میشود که هر مسیر قابل تقسیم به قطعات مستقیم است و هر چه قطعات کوچکتر باشند قرابت خط شکسته با منحنی بیشتر است. هر قطعه خط مستقیم از مسیر منحنی تقسیم شده را، میتوان سطح شیب‌داری محسوب داشت و قاعده بدست آمده در بالا را برای آن بکار برد.

چون در تمام نقاط مسیر حاصل جمع $\frac{v^2}{2} + gh$ یکی است، تغییر توان دوم سرعت بستگی به شکل و طول راهی که جسم در آن بحرکت مشغول است ندارد و تنها تابع اختلاف ارتفاع نقاط مبداء و پایان حرکت است.

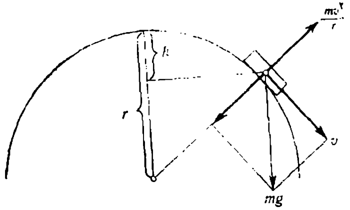
خواننده ممکن است فکر کند که نتیجه گیریهای ما با تجارب روزمره وفق نمیدهند: مگر نه اینستکه در راه کم نشیب و طولانی جسم بطور کلی سرعت نمیگیرد و دست آخر هم متوقف میشود. این مطلب درست است. اما فراموش نکنیم که ما نیروی اصطکاک را در مباحثات خود بحساب نیاوردیم. فرمول فوق‌الذکر برای حرکتی که تنها تحت تاثیر نیروی ثقل در میدان ثقل زمین انجام میگیرد صحت دارد. اگر نیروهای اصطکاک ناچیز باشند، این قانون بخوبی تحقق مییابد. سورتمه‌های دارای سرسره فلزی بر روی تپه‌های یخ زده با اصطکاک بسیار کمی میلغزند. میتوان مسیر یخی طویلی ساخت که ابتدا با سراشیبی تند و قابل سرعت گیری زیاد آغاز شود و سپس بطور حیرت انگیزی به بالا و پائین

برود. در چنین مسیر ناهمواری، در صورت فقدان کامل نیروی اصطکاک، ارتفاع نقطه پایان حرکت (جائی که سورتمه بخودی خود میایستد) برابر نقطه آغاز حرکت است. ولی بعلت ناگزیری اصطکاک، نقطه مبداء حرکت سورتمه بلندتر از نقطه توقف آن خواهد بود.

قانونی را که بر اساس آن، سرعت نهائی در جریان حرکت تحت تأثیر نیروی ثقل، تابع شکل مسیر نیست، میتوان برای حل مسائل جالب گوناگونی بکار برد.

در سیرک «معلق» قائم را بعنوان نمایشی جذاب نشان میدهند. دوچرخه‌سوار و یا ارابه حامل آکروبات روی سکوی بلندی قرار داده میشوند. بدنبال سقوط پرشتاب اولیه صعود به سر بالائی شروع میشود و آکروبات در حالتی واژگونه قرار میگیرد، از نو سراشیبی آغاز میگردد حلقه کاملی ترسیم میشود. مسئله‌ای که مهندسان سیرک موظف بحل آن هستند اینست که سکوی شروع حرکت را در چه ارتفاعی باید بسازند تا بندباز از نقطه اوج معلق سرنگون نشود؟ شرط این کار معلوم است: نیروی گریز از مرکز که بندباز را به مقر خود میفشارد بایستی نیروی ثقل را که متوجه بسمت مقابل است خنثی سازد. یعنی باید $mg \leqslant \frac{mv^2}{r}$ باشد. در اینجا r شعاع معلق و v سرعت حرکت در اوج معلق می‌باشد. برای دستیابی به این سرعت باید حرکت را از نقطه‌ای که باندازه h از نقطه اوج معلق فراتر است آغاز کرد. بدواً سرعت آکروبات مساوی صفر است لذا در نقطه اوج معلق $v^2 = 2gh$ خواهد بود. از سوی دیگر $v^2 \geqslant gr$ است یعنی بین ارتفاع h و شعاع معلق رابطه $h \geqslant \frac{r}{2}$ موجود است. پس سکو باید باندازه‌ای که کمتر از نصف شعاع معلق نباشد فراتر از نقطه اوج معلق قرار گیرد. با توجه به ناگزیری نیروی اصطکاک این رقم را باید با ذخیره در نظر گرفت.

باز هم مسئله دیگر: گنبد گردی را با سطحی بسیار صاف در نظر میگیریم، بطوریکه اصطکاک حداقل باشد. شیئی کوچکی را بر راس گنبد میگذاریم و با تکانی بسیار جزئی که بزحمت محسوس باشد آن شیئی را بر روی گنبد میلغزانیم. دیر یا زود جسم لغزنده از گنبد جدا شده و شروع به افتادن میکند. بآسانی میتوان لحظه جدا شدن جسم از سطح گنبدرا حساب کرد: در این لحظه نیروی گریز از مرکز باید مساوی مولفه وزن در امتداد شعاع باشد (در این لحظه جسم فشار خود بر



شکل ۳٤

گنبد را متوقف میسازد و این خود همان لحظه جدا شدن است). در تصویر ۳٤ دو مثلث متشابه دیده میشوند: در اینجا لحظه جدا شدن مجسم شده است. نسبت ضلع مجاور زاویه قائم و وتر در مثلث نیروها با نسبت اضلاع مربوطه مثلث دیگر برابر است:

$$\frac{\frac{mv^2}{r}}{mg}=\frac{r-h}{r}$$

در اینجا r شعاع گنبد کروی شکل و h اختلاف ارتفاع آغاز و انتهای لغزش است. حال از قانون عدم وابستگی سرعت نهائی به شکل مسیر استفاده میکنیم. چون سرعت اولیه جسم برابر صفر فرض شده است، $v^2=2gh$ خواهد بود. با گذاشتن این مقدار در تناسب بالا و انجام تبدیلات مربوطه ریاضی بدین نتیجه میرسیم که $h=\frac{r}{3}$ می‌باشد. یعنی جسم در ارتفاعی باندازه یک سوم شعاع پائین‌تراز راس گنبد، از سطح آن کنده میشود.

قانون بقای انرژی مکانیکی

از روی مثالهای بالا ما متوجه شدیم که دانستن کمیتی با مقدار عددی ثابت در جریان حرکت تا چه حد مفید است.

فعلاً ما چنین کمیتی را فقط در مورد یک جسم میدانیم. پس اگر در میدان ثقل چند جسم مربوط با یگدیگر در حرکت باشند چه؟

حساب اینکه برای هر کدام از آنها فرمول $\frac{v^2}{2}+gh$ عیناً صادق خواهد بود ممکن نیست، چونکه هر کدام از این اجسام تحت تاثیر نه فقط نیروی ثقل بلکه اجسام مجاور نیز قرار دارند. شاید مجموع اینگونه فرمولها برای گروه اجسام مورد نظر صحت خود را حفظ کند؟

در اینجا ما نشان خواهیم داد که چنین نظری فاقد صحت است. کمیتی که ضمن حرکت گروهی از اجسام ثابت میماند وجود دارد، ولی این کمیت جمع :

$$\left(\frac{v^2}{2}+gh\right)_{\text{جسم اول}}+\left(\frac{v^2}{2}+gh\right)_{\text{جسم دوم}}+\dots$$

نیست. بلکه برابر است با مجموع فرمولهای نظیر ضرب در اجرام اجسام مربوطه. بدیگر سخن این کمیت ثابت میماند

$$m_1\left(\frac{v^2}{2}+gh\right)_1+m_2\left(\frac{v^2}{2}+gh\right)_2+\dots$$

برای اثبات این مهمترین قانون مکانیک به مثال زیر رجوع میکنیم.

دو وزنه را از دو طرف به طنابی که روی قرقره‌ای انداخته شده است آویزان میکنیم. یکی با جرم بزرگ M و دیگری با جرم کوچک m. وزنه بزرگ وزنه کوچکتر را بطرف خود میکشد و گروه مرکب از دو جسم با سرعتی فزاینده بحرکت درمیاید.

در اینجا نیروی محرک را اختلاف وزن این دو جسم $Mg-mg$ تشکیل میدهد. از اینرو که جرم هر دو جسم در حرکت شتابدار شرکت دارند، قانون نیوتن بشکل زیر نوشته میشود :

$$(M-m)\,g=(M+m)\,a$$

دو لحظه حرکت را بررسی میکنیم و نشان میدهیم که حاصل جمع کمیات $\frac{v^2}{2}+gh$ ضرب در اجرام مربوطه واقعاً بدون تغییر میماند. یعنی لازم است تساوی زیر را باثبات رساند :

$$m\left(\frac{v_2^2}{2}+gh_2\right)+M\left(\frac{V_2^2}{2}+gH_2\right)=m\left(\frac{v_1^2}{2}+gh_1\right)+$$
$$+M\left(\frac{V_1^2}{2}+gH_1\right)$$

در اینجا مقادیر فیزیکی معرف وزنه بزرگ با حروف بزرگ نشان داده شده‌اند. علائم ۱ و ۲ مربوط به دو لحظه مورد بحث حرکت است.

از آنجا که وزنه‌ها با طناب بیکدیگر مربوطند، $v_1 = V_1$ و $v_2 = V_2$ می‌باشند.

پس از ساده کردن دو طرف تساوی و انتقال اعضای حاوی ارتفاع بطرف راست و اعضای حاوی سرعت بطرف چپ معادله زیر را بدست میاوریم :

$$\frac{m+M}{2}(v_2^2 - v_1^2) = mgh_1 + MgH_1 - mgh_2 - MgH_2 =$$
$$= mg(h_1 - h_2) + Mg(H_1 - H_2)$$

اختلاف ارتفاع وزنه‌ها البته با یکدیگر مساویند (ولی با علامت مخالف، چونکه یکی از وزنه‌ها بالا و دیگری پائین میاید). بدینسان $\frac{m+M}{2}(v_2^2 - v_1^2) = g(M-m)S$. در اینجا S مسافت طی شده را نشان میدهد.

در صفحه ۵۴ ما دانستیم که تفاضل توان دوم سرعت $v_1^2 - v_2^2$ در آغاز و پایان قطعه راه S که با شتابی مساوی a پیموده میشود، از روی فرمول زیر بدست میاید:

$$v_1^2 - v_2^2 = 2aS$$

با گذاشتن این فرمول در فرمول قبلی نتیجه میشود که

$$(m+M)a = (M-m)g$$

و این همان قانون نیوتن است که در بالا برای مثال ما نوشته شد. لذا آنچه که میخواستیم باثبات درآمد: برای دو جسم جمع $\frac{v^2}{2} + gh$ ضرب در اجرام مربوطه * در موقع حرکت بدون تغییر باقی میماند

---

* بدیهی است که عبارت $\frac{v^2}{2} + gh$ را می‌توان در $2m$ و یا $m/2$ و یا بطور کلی در هر ضریبی ضرب نمود. در اینجا ما قرار گذاشتیم به ساده‌ترین وجه عمل کنیم و آنرا ضرب در m نمائیم.

و یا باصطلاح ابقا میشود: یعنی

$$\left(\frac{mv^2}{2}+mgh\right)+\left(\frac{MV^2}{2}+MgH\right)=\text{const}$$

در مورد یک جسم این فرمول بشکلی که قبلاً اثبات شده بود درمیاید:

$$\frac{v^2}{2}+gh=\text{const}$$

نصف حاصلضرب جرم و توان دوم سرعت را انرژی سینتیک K می‌خوانند:

$$K=\frac{mv^2}{2}$$

حاصلضرب وزن جسم و ارتفاع آنرا انرژی پتانسیل کشش جسم بسوی زمین U می‌خوانند.

$$U=mgh$$

ما ثابت کردیم که در حین حرکت سیستم دو جسمی جمع انرژیهای سینتیک و پتانسیل ثابت میماند (اینرا می‌توان برای سیستمهای چند جسمی نیز ثابت کرد).

بسخن دیگر، افزایش انرژی سینتیک سیستم مرکب از چند جسم، تنها بحساب کاهش انرژی پتانسیل آن انجام‌پذیر است (بدیهی است که عکس قضیه نیز صادق است).

قانون ثابت‌شده را قانون بقای انرژی مکانیکی می‌نامند.

قانون بقای انرژی مکانیکی یکی از قوانین مهم طبیعت است. تاکنون ما هنوز اهمیت آنرا بنحو اکمل نشان نداده‌ایم. در مباحث بعد ضمن آشنائی با حرکت ملکولها، عمومیت و قابلیت کاربرداین قانون، برای تمام پدیده‌های طبیعت، آشکار خواهد شد.

کار

اگر جسمی را بدون اینکه با مانعی رو برو شود هل داده و یا بکشیم، جسم شتاب پیدا میکند. افزایش انرژی سینتیک ناشی از این عمل را

کار نیرو A می‌خوانند:

$$A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}$$

طبق قانون نیوتن شتاب جسم و نتیجتاً افزایش انرژی سینتیک آنرا بوسیله جمع برداری تمام نیروهای موثر بر آن معین میکنند. یعنی در صورت وجود چند نیرو فرمول $A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}$ کار نیروی منتجه است. اینک کار A را بوسیله کمیت نیرو نشان میدهیم.

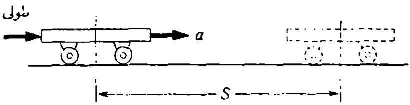
برای سهولت امر، بررسی را به موردی که حرکت فقط در یک سو ممکن است محدود میسازیم – واگنت دارای جرم m واقع بر روی ریل را هل میدهیم (و یا میکشیم) (تصویر ۳۵).

طبق فرمول عمومی حرکت با شتاب یکنواخت $v_2^2 - v_1^2 = 2aS$ می باشد. بنا بر این کار تمام نیرو ها در فاصله S را اینطور میشود نوشت:

$$A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = maS \text{ ،}$$

حاصلضرب ma برابر است با مولفه مجموع نیروها در امتداد حرکت. بدین ترتیب $A = f_{\text{طولی}} \times S$ میشود. یعنی کار انجام یافته بوسیله نیرو برابر است با حاصلضرب مسافت طی شده و مؤلفه این نیرو در امتداد مسیر – $f_{\text{طولی}}$.

فرمول کار برای تمام نیروها، صرفنظر از منشأ آنها و شکل مسیر حرکت، صدق میکند. تذکر میدهیم که حتی با وجود تاثیر نیروهائی



شکل ۳۵

بر جسم متحرک، کار ممکن است مساوی صفر باشد. مثلاً، کار نیروی کریولیس مساوی صفر است، چونکه این نیرو عمود بر سمت حرکت است و فاقد مولفه طولی میباشد.

اگر انحنای مسیر توام با تغییر سرعت نباشد نیازی بکار نیست، زیرا انرژی سینتیک در این حالت ثابت میماند.

آیا کار میتواند منفی باشد؟ میتواند. اگر نیرو با زاویه‌ای باز بر حرکت تاثیر کند، بجای کمک مزاحم آن خواهد شد یعنی مولفه طولی نیرو در امتداد حرکت منفی خواهد بود. در این حالت میگوئیم که نیرو کار منفی انجام میدهد. نیروی اصطکاک همواره با کند کردن حرکت، کار منفی انجام میدهد.

از روی افزایش انرژی سینتیک تنها میتوان در باره کار نیروی براینده قضاوت کرد.

برای تعیین کار نیروهای جداگانه، بایستی آنها را همچون حاصلضرب $f_{\text{طولی}} \times S$ مورد محاسبه قرار داد. اتوبیل یکنواخت در جاده حرکت میکند. اضافه انرژی سینتیک موجود نیست. یعنی کار نیروی براینده مساوی صفر است. اما روشن است که در اینحالت کار موتور برابر صفر نیست — این کار مساوی حاصلضرب نیروی کشش موتور و راه طی شده می‌باشد و تماماً صرف خنثی کردن نیروهای مقاومت هوا و اصطکاک میشود.

با استفاده از مفهوم «کار»، توصیف خصوصیات جالب نیروی ثقل که‌ما تازه با آن آشنا شده‌ایم، با اختصار و وضوح بیشتری میسر میگردد. اگر جسم تحت تاثیر نیروی ثقل جابجا شود انرژی سینتیک آن تغییر میکند. دگرگونی انرژی سینتیک برابر است با کار. ولی از قانون بقای انرژی ما میدانیم که افزایش انرژی سینتیک تنها بحساب کاهش انرژی پتانسیل ممکن است، لذا کار نیروی ثقل مساوی کاهش انرژی پتانسیل می‌باشد:

$$A = U_1 - U_2$$

بدیهی است که کاهش (یا افزایش) انرژی پتانسیل با افزایش (یا کاهش) مربوطه انرژی سینتیک، صرفنظر از مسیر حرکت جسم یکسان خواهد بود. این بدانمعنی است که کار نیری ثقل مستقل از شکل مسیر

است. اگر جسم از یک نقطه به نقطه دیگر باتزیید انرژی سینتیک منتقل شود، عکس این انتقال با کاهش انرژی سینتیک که از لحاظ کمیت دقیقاً مساوی افزایش قبلی است توام است. ضمن این، تطابق سیر «رفت» و «بازگشت» سهم نیست. این بدانمعنی است که میزان کار «رفت» و بازگشت یکسان است. اگر جسم پس از سیری طولانی به مبداء حرکت خود باز گردد میزان کار آن برابر صفر خواهد بود.

کانال عجیب و ویژه‌ای را مجسم کنید که جسم در آن بدون اصطکاک میلغزد. اگر جسم را از بلندترین نقطه این کانال روانه کنیم سرعت‌گیران راهی پائین میشود و بحساب انرژی سینتیک دریافتی، از سر بالائیها گذشته و بالاخره به نقطه آغاز حرکت باز میگردد. با کدام سرعت؟ البته با همان سرعتی که مبداء را ترک کرده بود. انرژی پتانسیل بمیزان قبلی خود باز میگردد. در اینصورت انرژی سینتیک نمی‌توانست نه افزایش و نه کاهش یابد، لذا کار مساوی صفر است.

کار در سیر حلقوی (بقول‌فیز یکدانان در مسیر مسدود) برای تمام نیروها مساوی صفر نیست. لزومی باثبات این مطلب نیست که مثلاً، کار نیروی اصطکاک با درازی راه افزایش مییابد.

با چه واحدهائی کار و انرژی را اندازه‌گیری میکنند

چون کار برابر تغییر انرژی است، کار و انرژی خواه پتانسیل و خواه سینتیک با واحدهای یکسانی اندازه‌گیری میشوند. کار برابر است با حاصلضرب نیرو در مسافت. کار انجام شده بوسیله نیروئی معادل یک دین در مسافت یک سانتیمتری را ارگ میخوانند:

$$1\,\text{erg} = 1\,\text{dyn} \times 1\,\text{cm}$$

این کاری است بسیار ناچیز که مثلا پشه در حال پرواز از انگشت شست به انگشت سبابه علیه نیروی ثقل انجام میدهد. در فیزیک واحد بزرگتری برای کار و انرژی بکار برده میشود بنام ژول که ۱۰ ملیون بار از ارگ بزرگتر است:

$$1\,\text{J} = 10000000\,\text{erg}$$

غالباً بعنوان واحد کار از کیلوگرم‌متر (kgfm) استفاده میشود و این کاری است که نیروئی برابر یک kgf در مسافت یک متری انجام میدهد و تقریباً معادل کار وزنه یک کیلوگرمی در موقع سقوط از میز به کف اطاق می‌باشد.

بطوریکه میدانیم یک کیلوگرم نیرو kgf برابر است با ۹۸۱۰۰۰ دین و یک متر با ۱۰۰ سانتیمتر. پس یک kgm کار مساوی ۹۸۱۰۰۰۰۰ ارگ و یا ۹٫۸۱ ژول خواهد بود. بر عکس یک ژول مساوی ۰٫۱۰۲ kgm است.

سیستم جدید واحدها (SI) که ما بدان اشاره کردیم و در آینده هم بدان استناد خواهیم جست، پیشنهاد میکند بعنوان واحد کار و انرژی از ژول استفاده شود و آنرا مانند کاری که نیروئی مساوی یک نیوتن (نگاه کنید به صفحه ۵۲) در فاصله یک متر انجام میدهد مشخص مینماید.

با در نظر گرفتن اینکه در این مورد چقدر آسان میتوان نیرو را تعیین کرد، رجحان این سیستم واحدها آشکار میشود.

کاهش انرژی

خواننده لابد کرده است که ضمن تشریح قانون بقای انرژی مکانیک ما مصراً شروطی مانند: «در حالت فقدان اصطکاک؛ اگر اصطکاک نباشد...» را تکرار کرده‌ایم. اما اصطکاک همراه ناگزیر هر گونه حرکتی است. قانونی که عاملی از لحاظ پراتیک بدین مهمی را در نظر نمیگیرد بچه درد میخورد؟ ما پاسخ این سئوال را به بعد موکول میکنیم. حالا ببینیم اصطکاک به چه نتایجی منجر میشود.

نیروهای اصطکاک علیه حرکت متوجه‌اند و کارشان منفی است. این امر ناگزیر به تلف شدن انرژی مکانیک میانجامد.

آیا این تلف جبری انرژی مکانیکی باعث متوقف ساختن حرکت میشود.

سیستم مسدودی مرکب از چند جسم دارای تاثیر متقابل را نزد خود مجسم کنیم. چنانکه میدانیم قانون بقای مقدار حرکت در مورد این

سیستم مسدود صحت دارد. سیستم مسدود قادر به تغییر مقدار حرکت خود نیست، لذا مستقیم و یکنواخت حرکت میکند. اصطکاک در چنین سیستمی ممکن است باضمحلال حرکات نسبی اجزاء مختلف این سیستم نسبت بیکدیگر منجر شود، ولی بر روی سرعت و سمت حرکت تمام سیستم تاثیری نخواهد داشت.

قانون دیگری هم در طبیعت موجود است بنام قانون بقای گشتاور چرخش (با این قانون ما بعداً آشنا خواهیم شد) که اجازه نمیدهد اصطکاک چرخش یکنواخت مجموعه سیستم مسدود را مضمحل سازد.

بدین ترتیب اصطکاک حرکات درونی سیستم مسدود اجسام را به توقف سوق میدهد، ولی در عین حال مانعی در راه حرکت مستقیم و یکنواخت مجموعه سیستم ایجاد نمیکند.

اگر کره زمین سرعت خود را باندازه ناچیزی تغییر میدهد، علتش در وجود اصطکاک اجسام زمینی باهم نیست بلکه در آنست که زمین را نمیتوان سیستمی منزوی بحساب آورد.

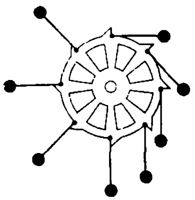
در مورد حرکت اجسام در کره زمین باید گفت که همه آنها در معرض اصطکاک قرار دارند و انرژی مکانیکی خود را از دست میدهند و نتیجتاً بدون تقویت از خارج بحالت توقف در خواهد آمد.

چنین است قانون طبیعت. اگر ممکن میشد طبیعت را فریب داد چه؟ آنگاه... آری آنگاه میشد پرپتوم موبیل را که به لاتینی بمعنای «حرکت جاوید» است بمرحله عمل درآورد.

پرپتوم موبیل

برتولد قهرمان «صحنه‌هائی از دوران شوالیه‌های» پوشکین آرزوی عملی ساختن پرپتوم موبیل را داشت. مصاحبش از او میپرسد: پرپتوم موبیل چیست؟ برتولد پاسخ میدهد: «این حرکت جاوید است. اگر حرکت جاوید را بیابم افق خلاقیت انسان تا بی‌نهایت ادامه خواهد یافت. ساختن طلا کاریست هوس انگیز هر اختراعی میتواند هدفهائی مانند حس کنجکاوی و یا کسب سود را بر آورده سازد؛ اما یافتن راه دستیابی به پرپتوم موبیل...».

پرپتوم موبیل یا گردونه حرکت جاوید ماشینی است که نه تنها برغم قانون کاهش انرژی مکانیکی عمل میکند بلکه ناقض قانون بقای انرژی مکانیکی، که چنانکه اکنون دیگر بر ما معلوم است، تنها در شرائط ایده‌آل و غیر قابل حصول یعنی در صورت فقدان اصطکاک عملی میباشد نیز هست. گردونه حرکت جاوید بلافاصله پس از ساخته شدن بایستی «خود بخود» شروع بکار کند – مثلاً، چرخی را بحرکت در آورد و یا وزنه‌ای را از پائین به بالا حمل کند و این کار باید بلا انقطاع و جاودانه ادامه یابد، بدون اینکه گردونه نیازی به سوخت، نیروی بازوی انسان، انرژی آبشار و خلاصه بچیزی که از خارج گرفته شود داشته باشد.

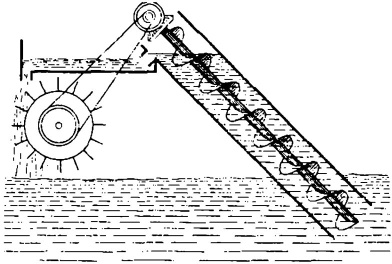


شکل ۳۶

نخستین سند معروف و موثق مربوط به «عملی ساختن» ایده گردونه جاوید که تا کنون ما از آن مطلعیم مربوط میشود به قرن ۱۳ میلادی. جالب توجه است که شش سده بعد در سال ۱۹۱۰ در یکی از موسسات علمی مسکو «طرح» کاملا مشابهی برای بررسی عرضه گشت.

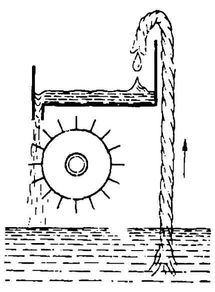
طرح این گردونه حرکت جاوید در تصویر ۳۶ آورده شده است. ضمن دوران چرخ وزنه‌ها به بالا پرتاب شده و بحساب مخترع حرکت خود را حفظ میکند، چونکه گویا وزنه‌های بالا انداخته شده با تاثیر در فاصله‌ای دورتر از محور چرخش نیروی بمراتب بیشتری دارند. پس از ساختن این ماشین ساده، مخترع مشاهده میکند که چرخ بعد از یکی دو دور چرخش از روی اینرسی متوقف میشود. اما این امر او را دلسرد نمیکند. حتماً اشتباهی رخ داده! اهرمها را باید درازتر ساخت و بر آمدگی‌ها را تغییر شکل داد. بدین ترتیب کار بی نتیجه‌ای که بسیاری از مخترعین سن در آوردی تمام زندگی خویش را وقف آن کرده بودند باز ادامه میابد، ولی البته تا همان موفقیت سابق.

رویهمرفته انواع گردونه‌های جاوید پیشنهاد شده زیاد نیستند. انواع مختلف چرخهای خودرو هیدرولیکی که با آنچه توصیف شد تفاوت اصولی ندارند – مثلاً، گردونه‌ای که در سال ۱۶۳۴ میلادی اختراع

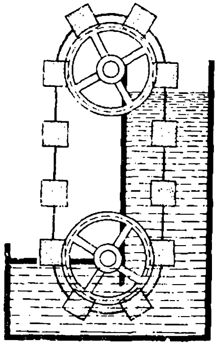


شکل ۳۷

شده و در تصویر ۳۷ نشان داده شده است؛ محرک‌هائی که با استفاده از سیفون و یا لوله‌های موئین (تصویر ۳۸) کار میکنند و آنهائی که از کاهش وزن اشیاء در آب (تصویر ۳۹) و یا از ربایش قطعات آهنی بوسیله



شکل ۳۸



شکل ۳۹

مغناطیس استفاده میکنند. همیشه نمیشود حدس زد که بنظر مخترع حرکت جاوید بحساب چه عاملی می‌بایست عملی گردد.

حتی قبل از پیدایش قانون بقای انرژی نیز فرهنگستان علوم فرانسه در سال ۱۷۷۵ اطلاعیه‌ای مبنی بر تصمیم به عدم پذیرش هر گونه پروژه مربوط به گردونه حرکت جاوید را منتشر ساخت که در آن بر روی عدم امکان پرپتوم موبیل تأکید شده بود.

بسیاری از مکانیستهای سده‌های ۱۷ الی ۱۸ اصل عدم امکان پرپتوم موبیل را بعنوان اصل مسلم پایه بسیاری از براهین خود قرار دادند. صرفنظر از اینکه مفهوم انرژی و قانون بقای انرژی مدتها بعد وارد علم شد.

در زمان حاضر بدیهی است که مخترعینی که در تلاش ساختن گردونه جاوید میباشند نه تنها با تجربه در تضاد قرار میگیرند، بلکه از دیدگاه منطق ابتدائی نیز مرتکب خطا میشوند، چون عدم امکان پرپتوم موبیل نتیجه مستقیم همان قوانین مکانیک است که این مخترعین پایه اختراع خود را بر آنها قرار میدهند.

برغم بی‌ثمری کامل خود، کاوش‌های گردونه جاوید احتمالا نقش تا اندازه‌ای مفیدی داشته‌اند، چونکه سرانجام به کشف قانون بقای انرژی ختم گردیدند.

تصادم

ضمن تصادم دو جسم مقدار حرکت همیشه محفوظ میماند، ولی انرژی، چنانکه ما روشن ساختیم، بعلت وجود اصطکاک، حتما کاهش مییابد.

اما اگر اجسام متصادم از ماده کشسان، مثلاً از استخوان یا فولاد ساخته شده باشند ضایعه انرژی بسیار ناچیز خواهد بود.

اینگونه تصادمات را که در جریان آنها مجموعهای انرژی سینتیک قبل و بعد از برخورد یکسان میماند تصادمات کشسان ایده‌آل می‌خوانند.

عملاً هنگام برخورد کشسانترین ماده‌ها نیز مقدار کمی از انرژی سینتیک بهدر میرود. این مقدار در مورد گویهای بلیارد در حدود ۳ تا ٤ درصد است.

بقای انرژی سینتیک در جریان ضربه کشسان حل برخی از مسائل را

ممکن میسازد. برای مثال تصادم مستقیم دو گوی دلخواه با جرمهای متفاوت را مورد بررسی قرار میدهیم. معادله مقدار حرکت بفرض اینکه گوی شماره ۲ تا قبل از ضربه در حالت سکون قرار دارد، اینطور نوشته میشود:

$$m_1 v_1 = m_1 u_1 + m_2 u_2$$

و انرژی

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2}$$

که در آن v_1 سرعت نخستین گوی قبل از تصادم و u_1 و u_2 سرعت گویها پس از تصادم میباشند میدهند.

از آنجا که حرکت در امتداد خط راست انجام میگیرد (خط گذرا از مرکز دو گوی که خود بمعنی مستقیم بودن ضربه است) استفاده از علائم برداری حتمی نیست.

از نخستین معادله معلوم میشود که

$$u_2 = \frac{m_1}{m_2}(v_1 - u_1)$$

با گذاشتن این مقدار در معادله انرژی بجای u_2 خواهیم داشت:

$$\frac{m_1}{2}(v_1^2 - u_1^2) = \frac{m_2}{2}\left[\frac{m_1}{m_2}(v_1 - u_1)\right]^2$$

پاسخ های $u_1 = v_1$ و $u_2 = 0$ که یکی از حل های این معادله را تشکیل میدهند جلب نظر ما را نمیکنند، چونکه تساوی $u_1 = v_1$ و $u_2 = 0$ بمعنی عدم تصادم بین گویهاست. از این به جستجوی حل دیگر این معادله می‌پردازیم.

پس از حذف $m_1(v_1 - u_1)$ از دو طرف معادله خواهیم داشت:

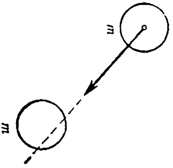
$$\frac{1}{2}(v_1 + u_1) = \frac{1}{2} \times \frac{m_1}{m_2}(v_1 - u_1)$$

یعنی

$$m_2 v_1 + m_2 u_1 = m_1 v_1 - m_1 u_1$$

یا

$$(m_1 - m_2) v_1 = (m_1 + m_2) u_1$$



شکل ۴۰

تساوی آخری رابطه زیررا برای مقدار سرعت گوی اولی پس از ضربه بدست میدهد :

$$u_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \times v_1$$

در جریان تصادم جبهه‌ای، خود با گوی بیحرکت، گوی ضارب در صورتیکه جرمش کمتر باشد بعقب پرتاب میشود (u_1 منفی است). اگر m_1 بیش از m_2 باشد هر دو گوی باهم در جهت ضربه بحرکت ادامه میدهند.

در بازی بلیارد آنگاه که ضربه دقیق جبهه‌ای باشد اغلب چنین صحنه‌ای مشاهده میشود: گوی ضارب ناگهان متوقف میشود و گوی مضروب بسمت کیسه توری بحرکت درمیاید. توضیح این امر را معادله‌ای که اخیراً پیدا کردیم دربردارد. چون جرم گویها مساویند از معادله آخری نتیجه میشود که $u_1 = 0$ است و این بدانمعنی است که $u_2 = v_1$ می‌باشد. گوی ضارب متوقف میشود و گوی دومی حرکت را با همان سرعت گوی ضارب شروع میکند.
گویها مثل اینکه سرعت خود را با یکدیگر معاوضه می‌نمایند.

مثال دیگری از تصادم اجسام بر طبق قانون ضربه کشسانی را مورد بررسی قرار میدهیم وآن، ضربه کج جسمی به جسم همجرم خود است (تصویر ۴۰). جسم دوم تا قبل از ضربه در حالت سکون قرار داشت، از اینرو قوانین بقای مقدار حرکت و انرژی را در این مورد اینطور باید نوشت :

$$mv_1 = mu_1 + mu_2$$

$$\frac{mv_1^2}{2} = \frac{mu_1^2}{2} + \frac{mu_2^2}{2}$$

—1300

با حذف جرم از دو طرف معادله خواهیم داشت:

$$\mathbf{v}_1 = \mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2$$

$$v_1^2 = u_1^2 + u_2^2$$

بردار v_1 جمع برداری u_1 و u_2 است، یعنی طول بردارهای سرعت باهم مثلث تشکیل میدهند.

این چه مثلثی است؟ قضیه فیثاغورس را بخاطر بیاوریم. معادله دوم ما بیانگر این قضیه است، لذا مثلث سرعتها باید مثلثی باشد قائم‌الزاویه با وتر v_1 و اضلاع مجاور زاویه قائمه u_1 و u_2. این نتیجه جالب نشان میدهد که در جریان هر ضربه کج کشسان، اجسام دارای جرم مساوی با زاویه‌ای قائمه از یکدیگر دور میشوند.

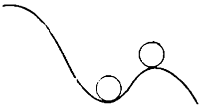
نوسانها

توازن

در برخی موارد حفظ موازنه کار دشواری است — برای آزمایش سعی کنید روی طنابی که محکم کشیده شده است راه بروید. اگر توانستید موازنه‌تان را حفظ کنید، بشما آفرین میگویند، در حالیکه برای شخصی که روی صندلی راحتی جنبان نشسته و تاب میخورد هیچ کس کف نمیزند. چرا؟ مگر او هم بحفظ موازنه خود مشغول نیست؟

تفاوت این دو مثال در چیست؟ در کدام مورد موازنه «خود بخود» برقرار میشود؟ در نظر اول مثل اینکه شرط موازنه واضح است. برای اینکه جسم از جای خود تغییر مکان ندهد نیروهای موثر بر آن باید متعادل باشند؛ بسخن دیگر مجموع این نیروها بایستی مساوی صفر باشد. این تعادل برای موازنه اجسام، شرطی است، حقیقتاً لازم، ولی ببینیم که آیا کافی هم هست؟

در شکل ۴۱ مقطع تپه‌ای ترسیم شده است که مدل آنرا بدون زحمت میتوان از مقوا ساخت. یک گلوله، بسته باینکه در کجای تپه قرار گرفته باشد، وضع و حالت مختلفی خواهد داشت. در نقاط واقع در شیب دامنه ای تپه، گلوله تحت تاثیر چنان نیروئی قرار میگیرد که



شکل ۴۱

آنرا بفرو غلطیدن وامیدارد. این نیروی موثر همان نیروی ثقل، و یا صحیح‌تر بگوئیم، تصویر آن بر امتداد خط مماس بر پروفیل تپه در نقطه مورد نظر است. از اینرو روشن است که هر اندازه شیب تپه ملایمتر باشد نیروی موثر بر گلوله نیز کمتر خواهد بود. نقاطی که در آنها نیروی ثقل با واکنش سطح اتکاء کاملا متعادل مشود و در نتیجه برآیند نیروهای موثر بر گلوله مساوی صفر است قبل از همه توجه ما را بخود معطوف میدارند. این شرط در قله‌ها و در پست‌ترین نقاط تپه، یعنی در فرورفتگی‌ها تامین میگردد. خطوط مماس بر این نقاط افقی هستند و برآیند نیروهای موثر بر گلوله برابر با صفر می‌باشد.

ولی در قله‌ها با وجودیکه برآیند نیروها مساوی صفر است. استقرار گلوله یا میسر نمیشود و یا در صورت توفیق در اینکار، ما بلافاصله متوجه علت جنبی آن که همانا اصطکاک است میشویم. با تکانی مختصر و یا حتی با فوتی که برای مقابله با نیروی اصطکاک کافی باشد، گلوله از نو از جای خود کنده شده و به پائین فرو میغلطد.

برای گلوله دارای سطح صیقلی و تپه صاف موازنه تنها در پائین‌ترین نقاط فرورفتگی‌ها امکان‌پذیر است. در این نقاط اگر با تکانی و یا بوسیله جریان هوا گلوله را از موضع خود خارج کنیم دوباره بخودی خود سر جایش باز خواهد گشت.

در گودالها و خندقها و فرورفتگی‌ها جسم بی‌تردید در حالت موازنه قرار دارد و اگر از این حالت خارج شود، تحت تاثیر نیروی بازگرداننده دوباره بمحل اولیه خود باز میگردد. در نقاط واقع در برجستگی‌های تپه کار بمنوال دیگری است. جسم با خروج از این نقاط بجای نیروی بازگرداننده در معرض تاثیر نیروی دورکننده قرار میگیرد و از حالت موازنه خارج میشود. پس تساوی برآیند نیروها با صفر فقط شرط لازم موازنه استوار است، نه کافی.

موازنه گلوله بر سطح تپه را میتوان از دیدگاه دیگری نیز مورد بررسی قرار داد. نقاط فرو رفته برای جسم متضمن حداقل و نقاط برجسته حداکثر انرژی پتانسیل هستند. قانون بقای انرژی مانع تغییر مواضعی است که در آنها انرژی پتانسیل حداقل میباشد، چونکه چنین تغییری باعث منفی شدن انرژی سینتیک میگشت که چنین چیزی

است غیر ممکن. در برجستگی‌ها برعکس وضع دیگری حکمفرماست. خروج از این نقاط با کاهش انرژی پتانسیل همراه است و باعث افزایش انرژی سینتیک میشود، نه کاهش آن. بدین ترتیب، در نقطه موازنه انرژی پتانسیل نسبت به نقاط همجوار باید حداقل باشد.

هرچه گودال ژرفتر باشد درجه پایداری بیشتر است. با علم بقانون بقای انرژی میتوان گفت در چه شرائطی جسم از گودال بیرون خواهد آمد. انرژی سینتیک کافی برای بالا بردن آن تا لبه گودال لازم است. هر اندازه گودال ژرفتر باشد مقدار انرژی سینتیک که برای برهم زدن موازنه پایدار لازم است بیشتر خواهد بود.

نوسانهای ساده

اگر گلوله واقع در عمق فرورفتگی را از جایش تکان بدهیم شروع به بالا رفتن از دیواره فرورفتگی میکند. ضمن این حرکت از انرژی سینتیک آن کاسته میشود. وقتی انرژی سینتیک بکلی از بین رفت، گلوله لحظه‌ای متوقف میگردد و حرکت معکوس بسوی پائین را آغاز مینماید. در این حالت تبدیل انرژی پتانسیل به سینتیک صورت میگیرد. پس از آن گلوله سرعت گرفته و با اینرسی از نقطه موازنه گذشته و از نو روی دیواره گودال صعود می‌نماید، منتهی این بار در دیواره مقابل. در صورت ناچیز بودن اصطکاک این حرکات «به‌بالا و به پائین» می‌توانند مدت مدیدی ادامه یابند و در حالت ایدآل، یعنی در شرایط عدم اصطکاک، تا ابد بطول انجامند.

بدین ترتیب، حرکت در جوار موقعیت موازنه پایدار پیوسته دارای خصلت نوسانی است. آونگ برای مطالعه نوسان مناسبتر از گلوله‌ایست که در گودال بالا و پائین میغلتد، به این علت که اصطکاک در آن بحد اقل تنزل مییابد. در حین نوسان، آنگاه که آونگ به انتهای مسیر خود میرسد، سرعت و انرژی سینتیک آن مساوی صفر میشوند. در این حالت انرژی پتانسیل حداکثر می‌باشد. با پائین آمدن وزنه انرژی پتانسیل کاهش یافته و به انرژی سینتیک

تبدیل میشود، یعنی بر سرعت حرکت افزوده میشود. با قرار گرفتن وزنه در پائین‌ترین نقطه انرژی پتانسیل آن حداقل و انرژی سینتیک و سرعت آن حداکثر است. وزنه طی حرکت بعدی خود از نو بالا میرود و ضمن این حرکت باز از میزان سرعت کاسته میشود و انرژی پتانسیل فزونی میابد.

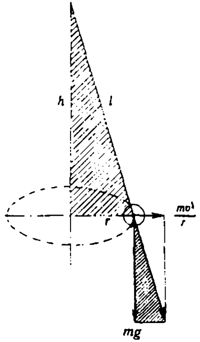
اگر از ضایعات حاصله از اصطکاک صرفنظر کنیم، وزنه بهمان اندازه که در ابتدا به چپ منحرف شده بود براست متمایل خواهد شد. انرژی پتانسیل به سینتیک تبدیل میگردد و سپس باز بهمان نسبت انرژی پتانسیل «نو» ایجاد میشود. تا اینجا ما نیمه اول نوسانرا مورد بحث قرار دادیم. نیمه دوم نوسان نیز دارای روند مشابهی است، با این تفاوت که وزنه در جهت معکوس حرکت میکند.

حرکت نوسانی حرکتی است مکرر، یا باصطلاح متناوب. هر بار که وزنه به نقطه مبداء باز میگردد حرکت خود را چه از لحاظ مسافت پیموده شده و چه از لحاظ سرعت و شتاب تکرار میکند (البته اگر از تغییرات حاصله در اثر اصطکاک صرفنظر شود). زمان مصروف برای یک نوسان یعنی برای بازگشت به مبداء، برای نوسان اول، دوم و همه نوسانهای بعدی یکسان خواهد بود. این مدت زمان یکی از مهمترین مشخصات نوسان است که بنام دوره نوسان خوانده میشود و ما آنرا با حرف T نشان خواهیم داد. با انقضای زمان T حرکت تکرار میشود، یعنی با گذشت مدت T ما می‌توانیم دوباره جسم در حال نوسانرا در همان نقطه فضا و متحرک در همان جهت بیابیم. بعد از نیم دوره، تغییر مکان جسم نوسان‌کننده و همچنین سمت حرکت آن تغییر علامت میدهند. چون دوره T مدت زمان یک نوسان است، تعداد نوسانها n در واحد زمان مساوی خواهد بود با $1/T$.

ببینیم دوره نوسان اجسام نوسان‌کننده در نزدیک موضع موازنه پایدار بطور کلی و دوره نوسان آونگ بویژه بچه عواملی مربوط است؟ برای اولین بار، گالیله این مسئله را مطرح ساخت و حل کرد. ما اکنون فرمول دوره نوسان آونگ را خواهیم یافت.

اما در مورد حرکت شتابدار ناموزون کاربرد قوانین مکانیک بشیوه‌ی ابتدائی مشکل است. برای فرار از این اشکال، وزنه آونگ را وادار

میکنیم بجای نوسان در صفحه قائم مسیر دایره مانندی را ضمن اینکه همواره در ارتفاع واحدی بماند، بپیماید. ایجاد چنین حرکتی دشوار نیست. برای این امر کافی است به آونگی که از موقعیت موازنه خارج شده است ضربه اولیه را دقیقاً در جهت عمود بر شعاع مسیر دایره‌ای که انتهای آونگ باید بپیماید وارد آورد و در ضمن نیروی این ضربه را پیدا کرد.



شکل ۴۲

شکل ۴۲ چنین آونگ دواری را نشان میدهد.

وزنه کوچک با جرم m در مسیر دایره‌ای حرکت میکند. این بدانمعنی است که سوای نیروی ثقل mg، نیروی گریز از مرکز $\frac{mv^2}{r}$ که ما آنرا می‌توانیم بصورت $4\pi^2n^2rm$ بنویسیم، نیز بر وزنه تاثیر میکند. در اینجا n تعداد دور در ثانیه را تشکیل میدهد، بنا بر این نیروی گریز از مرکز را میتوان مساوی $m\times\frac{4\pi^2r}{T^2}$ دانست. برآیند این دو نیروست که نخ آونگ را میکشد.

در روی شکل دو مثلث متشابه هاشور زده شده‌اند — مثلثهای نیرو و مسافت. نسبت اضلاع مجاور زاویه قائمه هر دو مثلث با یکدیگر مساویند:

$$\frac{mgT^2}{m4\pi^2r}=\frac{h}{r}$$

یا

$$T=2\pi\sqrt{\frac{h}{g}}$$

دوره نوسان آونگ تابع چه عواملی است؟ اگر ما آزمایشهای خود را تنها در یک نقطه زمین انجام دهیم (g ثابت میماند) دوره

نیست، فقط به اختلاف ارتفاع بین نقطه آویزش نخ و نقطه استقرار وزنه وابسته است. در میزان ثقل جرم (وزنه)، مثل همیشه، بر دوره نوسان تأثیری ندارد.

تذکر نکته زیر جالب است. چون ما نوسانرا در نزدیکی موقعیت موازنه پایدار بررسی میکنیم یعنی در شرائطی که تغییر مکان آونگ کم است و در نتیجه اختلاف ارتفاع h جزئی است، میتوان بجای h طول آونگ، l را گذاشت. اشتباه حاصله از این تعویض را بسهولت میتوان تخمین زد. اگر طول آونگ یک متر و شعاع انحراف آن یکسانتیمتر باشد:

$$h=\sqrt{10000-1}=99{,}995 \text{ cm}$$

خواهد بود.

از اینجا پیداست که تفاوت یک درصد بین h و l در حالتی ایجاد خواهد شد که انحراف آونگ ۱۴ سانتیمتر باشد. با این ترتیب دوره نوسان آزاد آونگ را برای انحرافات نه چندان زیاد از موقعیت موازنه میتوان بشکل زیر نوشت:

$$T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

این بدانمعنی است که دوره نوسان تنها به درازای آونگ و شتاب نیروی ثقل در محل آزمایش بستگی دارد و بمیزان انحراف آونگ از موقعیت موازنه مربوط نیست.

فرمول $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ را برای آونگ دوار ثابت کردیم، پس برای آونگ معمولی «مسطح» چه میشود؟ از قرار معلوم این فرمول برای این مورد نیز صحت دارد. در اینجا ما از اثبات دقیق این قضیه چشم‌پوشی میکنیم، اما توجه خواننده را بدین نکته معطوف میداریم که سایه وزنه منعکسه بوسیله آونگ دوار بر روی دیوار تقریباً عین آونگ «مسطح» است. در همان مدتی که وزنه دایره‌ای ترسیم میکند سایه آن درست یک نوسان انجام میدهد.

کاربرد نوسانهای کم‌دامنه در نزدیکی موقعیت موازنه اندازه‌گیری زمانرا با دقتی زیاد ممکن میسازد.

به روایتی، گالیله فقدان ارتباط دوره نوسان آونگ با دامنه و جرم آنرا بهنگام عبادت در کلیسا، در حالیکه مشغول مشاهده نوسان دو لوستر بزرگ بود دریافت.

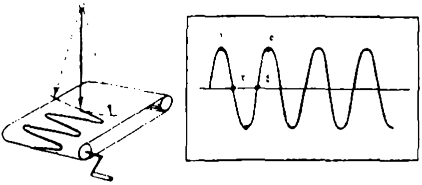
باین ترتیب دوره نوسان آونگ متناسب است با جذر طول آن. مثلاً، دوره نوسان آونگی که درازایش یکمتر است دو بار بیش از دوره نوسان آونگ ۲۵ سانتیمتری است. بعلاوه از فرمول دوره نوسان آونگ نتیجه‌گیری میشود که یک آونگ در نقاط مختلف زمین دارای سرعت نوسان یکسانی نیست. با نزدیکی به خط استوا شتاب نیروی ثقل کاهش می‌یابد و بر دوره نوسان افزوده میشود.

دوره نوسانرا می‌توان با دقت زیادی اندازه‌گیری کرد و بنابراین استفاده از آونگ امکان سنجش بسیار دقیق شتاب نیروی ثقل را فراهم میسازد.

واتابش نوسان‌ها

به قسمت تحتانی وزنه آونگ نوک مداد نرمی را وصل میکنیم و آنرا طوری بر روی صفحه کاغذ قرار میدهیم که مداد با کاغذ تماس پیدا کند (شکل ۴۳). حال اگر آونگ را کمی منحرف کنیم مداد ضمن نوسان با آونگ خط راست کوچکی ترسیم میکند.

در وسط مسیر حرکت، وقتیکه آونگ از موقعیت موازنه عبور میکند، خط ترسیم شده بوسیله مداد پررنگتر خواهد بود، زیرا در این



شکل ۴۳

حالت مداد فشار بیشتری بر کاغذ وارد میآورد. در صورتیکه کاغذ را در سمت عمود بر سطح نوسان بحرکت در آوریم، بر صفحه کاغذ نوعی منحنی رسم خواهد شد که در شکل ۳؛ آمده است. بسادگی میتوانیم دریابیم که موجکهای منحنی آنگاه که حرکت کاغذ کند میشود بهم نزدیکتر و هر چه کاغذ تندتر حرکت کند از هم دورتر خواهند شد. برای اینکه منحنی، چنانکه در شکل نشان داده شده است منظم ترسیم شود، حرکت کاملاً یکنواخت کاغذ ضروری است.

با این کار مثل اینکه نوسان را واتابیده‌ایم. واتابش برای نشان دادن موضع و سمت حرکت وزنه آونگ در این و یا آن لحظه زمانی لازم است. در نظر مجسم کنید که از لحظه قرار گرفتن آونگ در یکی از مواضع انتهائی، مثلاً در سمت چپ میانگاه مسیر خود، کاغذ با سرعت ۱ cm/s بحرکت درآورده شود. ما این موضع اولیه را با نقطه ۱ مشخص میسازیم. با سپری شدن ۱/٤ دوره، آونگ از میانگاه مسیر خود خواهد گذشت. در این مدت کاغذ باندازه $\frac{1}{4}T$ سانتیمتر حرکت کرده است. در شکل این نقطه با عدد ۲ علامت گذاری شده است. سپس آونگ بسمت راست بحرکت در میآید و همزمان با آن کاغذ بحرکت خود ادامه میدهد. تا لحظه‌ای که آونگ به موضع انتهائی خود برسد، کاغذ باندازه $\frac{1}{2}T$ سانتیمتر جابجا شده است که در شکل همان نقطه ۳ می‌باشد. آونگ از نو به میانگاه خود نزدیک میشود و در زمان $\frac{3}{4}T$ به حالت موازنه در میآید که در شکل با نقطه ٤ نشان داده شده است. نقطه ٥ اختتام یک دور کامل نوسانرا مشخص میسازد و سپس در هر T ثانیه و یا درهر T سانتیمتر از روی ترسیم این پدیده تکرار میشود.

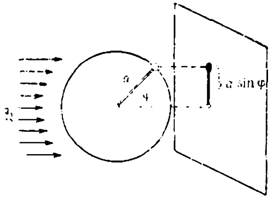
بر روی ترسیم، خط قائم معرف تغییر مکان نقطه از موقعیت موازنه و خط افقی میانه شاخص زمان است.

از روی این ترسیم میتوان بسهولت دو کمیت کاملا تعیین کننده نوسانرا بدست آورد. دوره را معمولاً از روی فاصله بین دو نقطه مشابه، مثلاً بین دو راس همجوار معین میکنند و ضمن این کار دامنه نوسانرا

هم که حداکثر انحراف از موقعیت موازنه است اندازه‌گیری می‌نمایند.
واتابش نوسان بعلاوه بما امکان میدهد به سئوال مطروح در بالا در باره موضع جسم در حال نوسان در این و یا آن لحظه زمانی پاسخ دهیم. مثلاً، نقطه نوسان کننده پس از ۱۱ ثانیه در کجا واقع خواهد بود؟ اگر دوره نوسانرا ۳ ثانیه و مبدأ حرکت را از انتهای سمت چپ فرض کنیم، بعلت اینکه در هر ۳ ثانیه یکبار نوسان تکرار میشود، پس از ۹ ثانیه جسم باز در همان موضع اولیه خود قرار خواهد داشت لذا لزومی ندارد از ترسیم مرکب از چند دوره نوسان استفاده شود. برای مثال ما منحنی یک نوسان کاملاً بسنده است. در حالتی که دوره نوسان ۳ ثانیه است موضع نقطه نوسان کننده پس از ۱۱ ثانیه همانجائی خواهد بود که پس از ۲ ثانیه قرار داشت. با جدا کردن ۲ سانتیمتر بر روی ترسیم مشاهده خواهیم کرد که پس از ۱۱ ثانیه نقطه نوسان کننده در بین انتهای راست مسیر و موقعیت موازنه قرار گرفته است. علت جدا کردن ۲ سانتیمتر اینست که ما قبلاً شرط کرده بودیم که سرعت کاغذ مساوی cm/s و یا بعبارت دیگر مقیاس رسم طوری باشد که هر یک سانتیمتر معادل یک ثانیه گردد. بدین طریق اندازه انحراف در لحظه مورد نظر را از روی رسم پیدا میکنیم.
برای یافتن میزان انحراف نقطه که در اطراف حالت موازنه نوسانهای کوچکی انجام میدهد، استفاده از ترسیم چندانیم ضرورتی ندارد. تئوری نشان میدهد که منحنی نمودار رابطه انحراف با زمان دارای شکل سینوسوئید است. اگر انحراف نقطه نوسان کننده را با y، دامنه نوسانرا با a و دوره آنرا بوسیله T نشان دهیم، اندازه انحراف در مدت زمان t پس از آغاز نوسانرا میتوان از طریق فرمول زیر محاسبه نمود:

$$y = a \times \sin ۲\pi \frac{t}{T}$$

نوسانی که بر طبق این قانون انجام میگیرد، بنام نوسان هارمونیک (هم آهنگ) خوانده میشود. آرگومان سینوس برابر است با حاصلضرب ۲π در t/T این حاصلضرب را فاز نوسان مینامند.
با در دست داشتن جداول مثلثاتی و معلوم بودن دوره و دامنه



شکل ٤٤

نوسان میزان انحراف نقطه نوسان کننده را بسهولت میتوان محاسبه نمود و از روی اندازه فاز نوسان بسمت حرکت آن پی برد.

با بررسی حرکت سایه‌ی وزنه متحرک در مدار دایروی، اثبات فرمول حرکت نوسانی آسان میشود.

نقطه وسط مسیر را مبدأ علامت گذاری نقاط تغییر مکان سایه قرار میدهیم. در مواضع انتهائی، تغییر مکان (y) مساوی است باشعاع دایره a که همان دامنه نوسان سایه است.

در همان زمانی که وزنه زاویه φ را از میانگاه مسیر دایره‌ای خود طی میکند (شکل ٤٤) سایه آن باندازه $a \sin \varphi$ از میانگاه خود دور میشود.

فرض کنیم دوره نوسان وزنه (که البته دوره نوسان سایه نیز هست) مساوی T باشد، یعنی وزنه در زمان T راهی معادل 2π رادیان را بپیماید. در این صورت تناسب زیر را که در آن t زمان گردش وزنه باندازه زاویه φ است می‌توان نوشت:

$$\frac{\varphi}{t} = \frac{2\pi}{T}$$

از اینجا نتیجه میشود که $\varphi = \frac{2\pi t}{T}$ و $y = a \sin \frac{2\pi t}{T}$ می‌باشد.

یعنی همان چیزی که ما میخواستیم پیدا کنیم.

تغییر سرعت نقطه نوسان کننده نیز از روی قانون سینوس انجام میگیرد. این نتیجه گیری از همان بررسی حرکت سایه وزنه متحرک در مسیر دایره‌ای بدست میآید. سرعت این وزنه برداری است با طول ثابت

که بوسیله v_0 نشان داده میشود و همراه با وزنه میچرخد. حال اگر بردار سرعت را مانند جسمی پیکانی و قادر به سایه افکنی در نظر بگیریم، در مواضع انتهائی وزنه، این بردار در امتداد تابش نور قرار میگیرد و بنابراین فاقد سایه خواهد بود. هنگامیکه وزنه از موضع اولیه خود در مسیر دایره‌ای زاویه θ را پیمود بردار سرعت نیز باندازه همین زاویه چرخش خواهد کرد و تصویرش مساوی با $v_0 \sin\theta$ خواهد بود. اما بر اساس همان دلایل قبلی $\frac{\theta}{t} = \frac{2\pi}{T}$ و لذا کمیت لحظه‌ای سرعت جسم نوسان کننده عبارتست از

$$v = v_0 \sin \frac{2\pi}{T} t$$

باید توجه داشته باشیم که در فرمول تعیین اندازه انحراف آونگ، محاسبه زمان از میانگاه مسیر شروع میشود در حالیکه در مورد فرمول سرعت آغاز محاسبه از موضع انتهائی است. انحراف وزنه از حالت قائم در میانگاه مسیرش و میزان سرعت آن در موضع انتهائی مساوی صفراند.

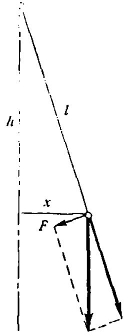
بین دامنه سرعت نوسان v_0 (در برخی موارد میگویند اندازه آمپلیتودی سرعت) و دامنه تغییر مکان آونگ رابطه ساده‌ای موجود است. وزنه در مدت زمان مساوی با دوره نوسان T دایره‌ای با پیرامون $2\pi a$ ترسیم میکند. با این ترتیب، $v_0 = \frac{2\pi a}{T}$ و $v = \frac{2\pi a}{T} \sin \frac{2\pi}{T} t$ می‌باشد.

نیرو و انرژی پتانسیل در جریان نوسان

ضمن هرگونه نوسان در جوار موقعیت موازنه نیروئی پدیدار میشود که «خواهان» بازگرداندن جسم نوسان کننده بموقعیت موازنه است. با دور شدن نقطه از موقعیت موازنه این نیرو حرکت را کند میکند و هنگام نزدیک شدن به این موقعیت حرکت را شتابان میسازد.

این نیرو را در مثال آونگ بررسی میکنیم. میدانیم که وزنه آونگ

تحت تاثیر نیروی ثقل و نیروی کشش نخ قرار دارد. نیروی ثقل را به دو مؤلفه‌اش تقسیم میکنیم — یکی در امتداد نخ و دیگری در جهت عمود بر آن در سمت مماس بر مسیر. برای حرکت تنها سازنده مماس نیروی ثقل حائز اهمیت است، چون این نیروست که نقش بازگرداننده را بعهده دارد. در مورد نیروی موثر در امتداد نخ باید متذکر شد که این نیرو با واکنش میخی که آونگ از آن آویزان شده است متعادل میشود و محاسبه‌آن تنها برای ارزیابی درجه استحکام نخ که آیا قادر به تحمل سنگینی آونگ هست یانه، لازم میباشد.



شکل ٤٥

کمیت تغییر مکان وزنه را بوسیله x مشخص میسازیم. در ضمن یادآور میشویم که مسیر تغییر مکان قوسی شکل است، اما بر طبق شرط قبلی مبنی بر مطالعه نوسان در نزدیکی موقعیت موازنه تفاوت تغییر مکان در مسیر قوسی و خط مستقیم انحراف وزنه از قائم را نادیده میگیریم. دو مثلث متشابه را مورد بررسی قرار میدهیم (شکل ٤٥) نسبت اضلاع مجاور زاویه قائمه و وترهای این مثلثها با یکدیگر متساوی هستند

$$F=\frac{mg}{l}x \quad \text{یا} \quad \frac{F}{x}=\frac{mg}{l}$$

مقدار mg/l هنگام نوسان تغییر نمیکند. حال اگر این کمیت ثابت را با حرف k نشان بدهیم نیروی بازگرداننده $F=kx$ خواهد بود. در اینجا ما به نتیجه مهم زیر میرسیم که کمیت نیروی بازگرداننده مستقیماً متناسب است با اندازه تغییر مکان نقطه نوسان کننده از موقعیت موازنه. نیروی بازگرداننده در مواضع انتهائی حداکثر میباشد. در موقع گذار جسم از میانگاه مسیر خود این نیرو ابتدا بصفر میگراید و سپس تغییر علامت و یا به‌بیانی دیگر تغییر جهت میدهد. تا زمانیکه انحراف جسم از موقعیت موازنه براست است، جهت تاثیر نیرو بطرف چپ می‌باشد و برعکس.

آونگ ساده‌ترین مثال جسم در حال نوسان محسوب میشود ولی ما علاقمندیم که فرمولها و قوانین بدست آمده در این مورد را بر تمام انواع نوسان تعمیم دهیم.

دوره نوسان آونگ بوسیله درازای آن مشخص میشود. چنین فرمولی تنها بدرد آونگ میخورد. ولی ما می‌توانیم دوره نوسانهای آزاد را باضریب ثابت نیروی بازگرداننده k مشخص سازیم. چون $k=\frac{mg}{l}$ است پس $\frac{l}{g}=\frac{m}{k}$ خواهد بود و در نتیجه:

$$T=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

از آنجا که هر نوسان آزادی تحت تاثیر نیروی بازگرداننده انجام میگیرد، این فرمول برای تمام موارد نوسان تعمیم پذیر است.

حالا انرژی پتانسیل آونگ را بوسیله تغییر مکان x از موقعیت موازنه مشخص میسازیم. در پائین‌ترین نقطه مسیر نوسان انرژی پتانسیل وزنه را میتوان برابر صفر انگاشت و محاسبه ارتفاع صعود را باید از این نقطه انجام داد. حال اگر اختلاف ارتفاع نقطه آویزش و موضع وزنه منحرف از موقعیت موازنه را با حرف h نشان دهیم، رابطه انرژی پتانسیل را می‌توانیم اینطور بنویسیم:

$$U=mg\,(l-h)$$

و یا با استفاده از فرمول تفاضل توانهای دوم:

$$U=mg\frac{l^2-h^2}{l+h}$$

ولی چنانکه از روی شکل پیداست $l^2-h^2=x^2$ می‌باشد و در نتیجه l و h خیلی کم با هم تفاوت دارند، از اینرو بجای $l+h$ می‌توان $2l$ گذاشت، در اینصورت:

$$U=\frac{mg}{2l}x^2$$

و یا

$$U=\frac{kx^2}{2}$$

8*

انرژی پتانسیل جسم نوسان کننده با توان دوم تغییر مکان جسم
موقعیت موازنه تناسب مستقیم دارد.
صحت فرمول بدست آمده را مورد آزمایش قرار میدهیم. ضایعه
رژی پتانسیل با میزان کاری که نیروی بازگرداننده انجام میدهد
د برابر باشد. برای اینکار دو موضع جسم نوسان کننده، یعنی
و x_2 را مورد بررسی قرار میدهیم. اختلاف انرژیهای پتانسیل در
ن دو نقطه را از روی فرمول بالا تعیین میکنیم:

$$U_2 - U_1 = \frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2} = \frac{k}{2}(x_2^2 - x_1^2)$$

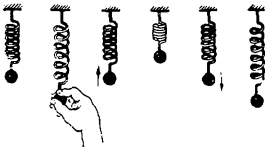
ا تفاضل توانهای دوم را میتوان بصورت حاصلضرب مجموع
تفاضل آنها نوشت.

$$U_2 - U_1 = \frac{k}{2}(x_2 + x_1)(x_2 - x_1) = \frac{kx_2 + kx_1}{2}(x_2 - x_1)$$

در اینجا $x_2 - x_1$ مسافتی است که جسم طی کرده، kx_1 و kx_2
قادیر نیروی بازگرداننده در آغاز و انتهای حرکت و $\frac{kx_1 + kx_2}{2}$
یانگین این نیروها را تشکیل میدهد.
با این ترتیب فرمول بالا ما را به نتیجه درستی رساند: ضایعه انرژی
تانسیل برابر با کار انجام شده است.

نوسان فنر

بسهولت میتوان گلولهای را با آویختن به فنری وادار به نوسان
کرد. انتهای فنر را بجائی وصل میکنیم و گلوله را میکشیم (شکل
۱). فنر تا موقعی در حالت کشش باقی میماند که ما با دست گلوله
ا بکشیم. همینکه دست خود را ول کردیم فنر جمع میشود
. گلوله شروع بحرکت بسوی موقعیت موازنه میکند در اینجا
ز همانند مورد آونگ فنر فوراً بحالت آرامش باز نمیگردد. گلوله



شکل ٤٦

بانیروی اینرسی از موقعیت موازنه گذشته و فنر شروع به جمع شدن میکند. در این حالت حرکت گلوله کند میشود و در لحظه‌ای متوقف میگردد تا فوری حرکت را از نو در جهت دیگر آغاز کند. نوسان با تمام علائم مشخصه‌ای که ضمن مطالعه آونگ با آنها آشنا شدیم بروز میکند. اگر اصطکاک نبود نوسان بی‌نهایت ادامه پیدا میکرد، ولی در صورت وجود اصطکاک نوسان بمیرائی میگراید و ضمناً هر چه اصطکاک بیشتر باشد سرعت میرائی نیز فزونتر است. غالباً فنر و آونگ، دارای نقشی مشابه‌اند. از هر دوی آنها بعنوان وسیله تثبیت دوره نوسان در انواع مختلف ساعتها استفاده میشود. کار دقیق ساعتهای فنری کنونی با حرکت نوسانی رقاصک تامین میشود و رقاصک نیز بنوبه خود بوسیله فنری که در شبانه روز دهها هزار بار باز و جمع میشود بحرکت در میآید.

برای گوی آویخته از نخ نقش نیروی بازگرداننده را سازنده مماس نیروی ثقل ایفا میکند، در حالیکه در مورد گوی متصل به فنر ایفای این نقش برعهده نیروی کشسانی فنر فشرده و یا کشیده و باز شده است. با این ترتیب کمیت نیروی کشسان با مقدار تغییر مکان تناسب مستقیم دارد: $F = kx$

ضریب k در این مورد دارای معنی دیگریست یعنی شاخص درجه استحکام فنر است. فنری محکم است که بسختی قابل انقباض و یا انبساط باشد و این خصوصیت را از لحاظ کمیت ضریب k منعکس میکند. چنانکه از فرمول بر میآید k برابر است با نیروی لازم برای کشش و یا انقباض فنر بقدر یک واحد درازا.

با دانستن درجه استحکام فنر و جرم وزنه آویخته به آن، بیاری فرمول $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ میتوانیم دوره نوسان آزاد را بیابیم. مثلاً وزنه‌ای با جرم

ده گرم که متصل به فنری با درجه استحکام برابر 10^{4} din/cm میباشد (این فنری است بحد کافی محکم که وزنه صد گرمی قادر است آنرا باندازه ۱ cm کشش بدهد) دوره نوسانی مساوی $T=6/28\times10^{-2}$ sec خواهد داشت یعنی در یک ثانیه شانزده بار نوسان خواهد کرد.

هر چه فنر نرمتر باشد نوسان کندتر انجام میگیرد. سنگین کردن وزنه نیز دارای تاثیری مشابه با آنست.

حال قانون بقای انرژی را برای گوی متصل به فنر بکار می‌بریم. میدانیم که برای آونگ مجموع انرژی سینتیک و پتانسیل $K+U$ کمیتی است ثابت یعنی در هر حال $K+U$ محفوظ میماند.

اگر بجای K و U مقادیر آنها را که بر ما معلوم است بگذاریم قانون بقای انرژی حاکی از آن خواهد بود که $\frac{mv^2}{2}+\frac{kx^2}{2}$ محفوظ میماند و همین موضوع در باره گوی متصل به فنر نیز صدق میکند.

نتیجه‌ای که جبراً از اینجا بدست میآید بسیار جالب است. بغیر از انرژی پتانسیلی که ما قبلاً با آن آشنا شدیم نوع دیگری از انرژی پتانسیل نیز موجود است. نوع اول را انرژی پتانسیل جاذبه می‌نامند. در صورتی که فنر در حالت افقی قرار میگرفت، البته انرژی پتانسیل جاذبه در هنگام نوسان تغییر نمییافت. انرژی پتانسیل جدیدی را که ما در اینجا مشاهده کردیم انرژی پتانسیل کشسان میخوانند. در مثال مورد بحث ما این نیرو مساوی $kx^2/2$ است که خود بمعنی وابستگی مستقیم این نیرو با درجه استحکام فنر و مقدار انقباض و یا کشش آن بتوان دو می‌باشد.

انرژی کامل نوسان را که دارای مقدار ثابتی است میتوان بشکل $E=\frac{ka^2}{2}$ و یا $E=\frac{mv_0^2}{2}$ نوشت. در این دو فرمول a و v_0 حداکثر مقادیر تغییر مکان و سرعت در حین نوسان را تشکیل میدهند که همان دامنه‌های نوسان و سرعت نوسان میباشند. منشأ این فرمولها کاملاً مفهومند. در موضع انتهائی، آنگاه که $x=a$ است، انرژی سینتیک نوسان برابر با صفر و انرژی کامل سیستم مآلاً مساوی انرژی پتانسیل آن است. در میانگاه مسیر نوسان تغییر مکان نقطه نوسان کننده از موقعیت موازنه و هم نتیجتاً انرژی پتانسیل مساوی با

صفر است. در این لحظه سرعت حداکثر: ($v=v_{.}$) و انرژی کامل برابر است با انرژی سینتیک.

در فیزیک آموزش نوسان مبحثی است گسترده. ما بکرات با آونگها و فنرها برخورد خواهیم کرد، اما روشن است که فهرست اجسامی که نوسانشان باید مورد بررسی قرار گیرد باین دو مورد ختم نمیشود پایه‌های مخصوص نصب ماشین نوسان میکنند. پل‌ها، قسمتهای مختلف ساختمانها، تیرها و خطوط شبکه‌های فشار قوی نیز در معرض نوسان قرار دارند. صدا هم نوسان هواست.

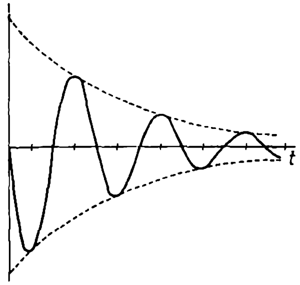
تا کنون ما چند نمونه از نوسانات مکانیکی را بر شمردیم. اما مفهوم نوسانرا نمی‌توان تنها منحصر به تغییر مکان مکانیکی اجسام و یا اجزاء آن از موقعیت موازنه دانست. ما در بسیاری از پدیده‌های الکتریکی نیز با نوساناتی بر میخوریم که بر طبق قوانین بسیار مشابهی با آنچه که در بالا از نظر گذشت جریان می‌یابند. باید گفت که آموزش نوسان در کلیه مباحث فیزیک رسوخ یافته است.

نوسانات بغرنج‌تر

مطالب گفته شده تاکنون مربوط به نوسان در اطراف موقعیت موازنه و تحت تاثیر نیروی بازگرداننده بود که از لحاظ اندازه مستقیماً متناسب با انحراف نقطه نوسان کننده از موقعیت نامبرده است. اینگونه نوسانات بر طبق قانون سینوسی جریان می‌یابند و بنام نوسانات هارمونیک مشهورند. دوره این نوسانات به دامنه آنها بستگی ندارد.

نوسانات پردامنه بمراتب پیچیده‌ترند و بر طبق قانون سینوسی جریان نمی‌یابند. وا تابش آنها منحنی‌های بغرنج‌تری را که در عین حال برای سیستم‌های مختلف نوسان متفاوتند بدست میدهد. در اینجا دیگر دوره از مختصات نوسان نبوده و با دامنه آن وابستگی پیدا میکند.

اصطکاک نیز بمیزان قابل توجهی نوسان را دگرگون میسازد. با وجود اصطکاک نوسان تدریجا بمیرایش میگراید. هرقدر اصطکاک فزونتر باشد درجه میرائی سریع‌تر است. آزمایش کنید آونگ غوطه‌ور در آب را به نوسان وادارید. بعید است که آونگ بیش از یک یا



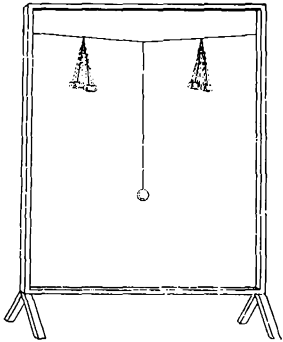
شکل ۴۷

دو نوسان بکند. اگر آونگ را در محیط پرغلظتی فرو بریم ممکن است اصلاً نوسان بوجود نیاید. در این شرایط آونگ منحرف شده از حالت موازنه بسادگی به آن حالت باز میگردد. در شکل ۴۷ منحنی مختص نوسان میرا نمایش داده شده است. محور قائم انحراف از حالت موازنه و محور افقی زمان را نشان میدهد. دامنه نوسان میرا (حداکثر شدت نوسان) پس از هر نوسانی کاهش می‌یابد.

رزونانس

کودکی را در تاب می‌نشانیم بطوریکه پاهایش بزمین نرسد. برای تاب دادنش البته ممکن است تاب را تا ارتفاع نسبتاً زیادی بلند کرد و سپس رها نمود. این کار تا اندازه‌ای توام با زحمت است. ضمناً احتیاج چندانی هم به آن نیست. کافی است تاب را هماهنگ با نوسان کمی هل داد تا اینکه پس از مدت زمان کوتاهی کاملاً بحرکت درآید.

برای تاب خوردن جسم باید تکان وارده بر آن هماهنگ با نوسان‌های آن باشد، بعبارت دیگر باید کاری کرد که دوره تکانهای وارده از خارج با دوره نوسان خصوصی تاب انطباق یابد. این پدیده را رزونانس می‌گویند.



شکل ۴۸

پدیده رزونانس در طبیعت و تکنیک بسیار شایع است و لذا در خور بررسی و توجه می‌باشد.
برای مثال پدیده سرگرم کننده و خود ویژه رزونانس را میتوانید با درست کردن اسبابی بشرح زیر مشاهده کنید. ریسمانی افقی را از دو طرف بکشید و بدان سه آونگ آویزان کنید (شکل ۴۸) بطوریکه دوتای آنها دارای طول یکسانی بوده و سومی درازتر باشد. حال اگر یکی از آونگ‌های کوتاه را جابجا کرده و رها سازید چند ثانیه بعد خواهید دید که آونگ کوتاه دومی نیز بتدریج شروع به نوسان میکند. چند لحظه بعد این آونگ چنان بنوسان در میآید که تشخیص مقدم و مؤخر بودن لحظه حرکت آونگها غیر ممکن میشود.
علت چیست؟ پاسخ این سؤال اینست که آونگهای هم درازا دارای نوسانات خصوصی یکسانی هستند. آونگ اولی آونگ دومی را بجنبش در میآورد و انتقال نوسان بوسیله ریسمان متصل کننده انجام میگیرد. اما آونگ دیگری هم که درازای آن با دو آونگ مذکور تفاوت داشت به ریسمان آویزان است. و هیچ حرکتی نمیکند. دوره نوسان این آونگ متفاوتست. و از اینرو آونگ کوتاه موفق به جنبانیدن آن نخواهد شد. آونگ سوم علیرغم‌حضور خود در

وضع جالب انتقال انرژی از آونگی به آونگ دیگر هیچگونه سهمی در این انتقال ندارد.

هر یک از ما به پدیده رزونانس مکانیکی اغلب برخورده‌ایم. فقط ممکن است به آن توجه نکرده باشیم، در عین اینکه برخی اوقات رزونانس بسیار هم ناراحت کننده است. مثلاً، تراموایی از روبروی پنجره شما میگذرد و در بوفه شما ظروف بصدا در می‌آیند. سبب چیست؟ نوسان زمین به ساختمان و همراه با آن به کف اطاق شما انتقال یافته و در نتیجه بوفه و محتوی آن به ارتعاش درآمده‌اند. انتقال نوسان از چنان فاصله دور و از طریق چندین واسطه انجام گرفته، زیرا پدیده رزونانس بوجود آمده و نوسانات خارجی با تطابق بر نوسانات خصوصی شدید شده‌اند. تقریباً هرگونه لرزش و جرنگ جرنگی را که در اطاق، یا کارگاه و یا اتوموبیل شنیده شود می‌توان بحساب رزونانس گذاشت.

رزونانس نیز همانند بسیاری از پدیده‌ها می‌تواند هم مفید و هم مضر باشد. ماشینی بر روی پایه خود قرار گرفته و اجزاء متحرک آن موزون و با دوره معین در حرکتند. اگر این دوره با دوره نوسان خصوصی پایه منطبق شود چه خواهد شد؟ پایه بزودی از جای خود تکان خواهد خورد و ممکن است کار بجای بدی کشیده شود.

واقعه‌ای که در پتربورگ اتفاق افتاد از این لحاظ حائز اهمیت است. یک گروهان سرباز با قدمهای هماهنگ از روی پلی میگذشت. پل ناگهان فرو ریخت. تحقیقات در باره این حادثه شروع شد. ظاهراً علتی برای وقوع چنین حادثه‌ای وجود نداشت. بارها روی این پل اجتماعات انبوهی جمع شده و گاریهای سنگین که وزنشان بمراتب بیش از وزن یک گروهان مذکور بود به آرامی از آن گذشته بودند.

معمولاً پل زیر تاثیر سنگینی بطور نامحسوسی خم میشود. ولی در صورت جنباندن پل میزان خمیدگی تا حد غیر قابل مقایسه‌ای افزایش می‌یابد. دامنه نوسان رزونانسی ممکن است حتی هزاران بار بیش از آن تغییر مکانی باشد که تحت تاثیر باری به همان وزن ولی غیر متحرک امکان‌پذیر است.

تحقیقاتی که بعمل آمد در تایید همین مطلب بود. علت ویرانی پل انطباق دوره‌های نوسان خصوصی پل با گامهای منظم و هماهنگ سربازان بود. اگر حرکت عابرین هماهنگ نباشد پدیده رزونانس

بوجود نمیآید و پل نمی‌جنبد. در هر صورت این حادثه شوم را مهندسین نیک بخاطر سپرده‌اند. از آن پس ضمن طرحریزی پل‌ها در نظر گرفته میشود که دوره نوسان خصوصی پل از دوره نوسانی که در نتیجه گامهای هماهنگ بوجود میآید بسیار متفاوت باشد. سازندگان پایه‌های ماشین‌ها نیز بهمین نحو عمل میکنند و میکوشند پایه را طوری بسازند که دوره نوسان آن از ادوار نوسان اجزاء متحرک ماشین متفاوت باشد.

حرکت اجسام جامد

گشتاور نیرو

امتحان کنید با دست چرخ طیارسنگینی را بچرخش درآورید. پره‌ها را بگیرید و بکشید. در این موقع اگر دستتانرا خیلی نزدیک محور بگیرید کار مشکل خواهد بود، ولی هرچه دست را بحلقه چرخ نزدیک‌تر بگیرید آسانتر خواهد شد. عامل متغییر در اینجا چیست؟ نیرو در هر مورد یکسان است. تنها نقاط تاثیر آن مختلف می‌باشد.

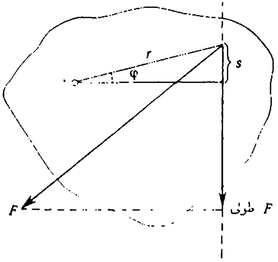
در کلیه مباحث قبلی مسئله نقطه اثر نیرو مطرح نبود. چونکه در مسائل مورد بررسی شکل و اندازه اجسام نقشی نداشتند و جسم ذهناً با نقطه تعویض میشد.

مثال مربوط به دوران چرخ نشان میدهد که در موارد چرخش و یا پیچاندن اجسام مسئله نقطه اثر نیرو بیهوده مطرح نمیشود.

برای فهمیدن نقش نقطه تاثیر نیرو به محاسبه کار لازم برای دوران جسمی باندازه زاویه معین می‌پردازیم. البته با این فرض که تمام اجسام جامد سخت بیکدیگر چسبیده‌اند (ما فعلا توجهی به قابلیت خمیدگی، تراکم و بطور کلی دگرگون شدن جسم معطوف نمیداریم). روی این اصل نیروی وارد بر یک نقطه جسم به تمام اجزاء آن انرژی سینتیک میدهد.

در جریان محاسبه این کار نقش نقطه اثر نیرو بروشنی آشکار میشود.

در شکل ۴۹ جسم نصب شده بر محوری نشان داده شده است. با دورانی باندازه زاویه کوچک φ نقطه اثر نیرو بر روی مسیر قوسی تغییر مکان میدهد و راهی معادل s طی میکند.



شکل ۹ ؛

با ساختن تصویر نیرو بر سمت حرکت، یعنی بر خط مماس بر دایره‌ای که مسیر حرکت نقطه است، فرمول کار A را که ما با آن آشنائیم می‌نویسیم :

$$A = F_{\text{طولی}} \times s$$

اما قوس s را می‌توان بشکل زیر نوشت

$$s = r\varphi$$

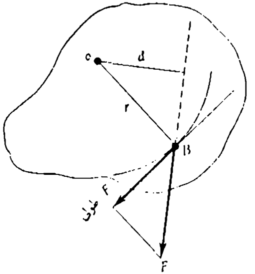
در اینجا r — فاصله محور چرخش تا نقطه تاثیر نیروست. با در نظر گرفتن این تساوی برای A فرمول زیر بدست میاید

$$A = F_{\text{طولی}} \times r\varphi$$

نتیجه‌ای که از اینجا حاصل میشود انست که اگر نقطه اثر نیرو بر جسم متفاوت باشد، در هر بار ضمن دوران جسم باندازه زاویه معین واحد، مقدار کار مصرف شده متفاوت خواهد بود. در صورت معلوم بودن زاویه‌دوران کار را حاصلضرب $F_{\text{طولی}} \times r$ مشخص میسازد که آن را گشتاور نیرو خوانند :

$$M = F_{\text{طولی}} \times r$$

به فرمول گشتاور نیرو می‌توان شکل دیگری داد. فرض کنیم



شکل ۵۰

O — محور چرخش و B — نقطه اثر نیرو باشد (شکل ۵۰). درازای عمود وارد از نقطه O به راستای نیرو را با حرف d نشان میدهیم. دو مثلث حاصله روی شکل با یکدیگر متشابه‌اند، بنا بر این:

$$\frac{F}{F_{\text{طولی}}} = \frac{r}{d} \quad \text{یا} \quad F_{\text{طولی}} \times r = Fd$$

کمیت d را بازوی نیرو می‌نامند.

فرمول جدید $M = Fd$ این‌طور خوانده میشود: گشتاور نیرو برابر است با حاصلضرب نیرو در بازوی آن.

اگر نقطه تاثیر نیرو را در امتداد راستای آن تغییر دهیم، بازوی d و همراه با آن گشتاور نیرو نیز بی‌تغییر باقی خواهد ماند و این بدانمعنی است که نقطه تاثیر نیرو بدون تفاوت می‌تواند در نقاط مختلف راستای نیرو قرار گیرد.

با استفاده از مفهوم جدید فرمول کار ساده‌تر میشود.

$$A = M\varphi$$

یعنی کار مساویست با حاصلضرب گشتاور نیرو در زاویه دوران.

فرض میکنیم بر جسمی دو نیرو با گشتاورهای M_1 و M_2 تاثیر کنند. ضمن دوران جسم باندازه زاویه φ ، کار انجام شده برابر $M_1\varphi + M_2\varphi = (M_1 + M_2)\varphi$ خواهد بود. این فرمول کوتاه

نشان میدهد که اندازه دوران جسم تحت تاثیر دو نیرو با گشتاورهای M_1 و M_2 همانست که بهنگام تاثیر نیروئی واحد با گشتاور M برابر جمع M_1+M_2 صورت میگیرد. گشتاورهای نیرو می‌توانند هم بیکدیگر کمک کنند و هم مزاحم یکدیگر باشند. در صورتیکه گشتاورهای M_1 و M_2 جسم را در جهت واحدی بچرخانند، دارای علائم جبری یکسانی خواهند بود و در صورت عکس علائم آنها مختلف می‌باشد.

چنانکه میدانیم کار تمام نیروهای وارده بر جسم مصروف تغییر انرژی سینتیک خواهد شد.

تند و یا کند شدن چرخش جسم بمعنای تغییر انرژی سینتیک است، و این خود در صورتی میسر است که برآیند گشتاورهای نیرو برابر صفر نباشد.

اگر برآیند گشتاورها مساوی صفر شد چه؟ پاسخ روشن است — انرژی سینتیک تغییری نمیکند و بالنتیجه جسم یا از روی اینرسی بچرخش یکنواخت ادامه خواهد داد و یا در حالت آرامش بسر خواهد برد.

از اینرو موازنه جسم دارای قابلیت چرخش تعادل تمام گشتاورهای نیروهای وارد بر آنرا ایجاب میکند. اگر دو نیرو تاثیر کنند، موازنه تساوی زیر را الزام میکند:

$$M_1 + M_2 = 0$$

تا زمانیکه جسم بعنوان یک نقطه مورد بررسی قرار میگرفت، شرائط موازنه ساده‌تر بود. در اینگونه مسائل چنانکه از قانون نیوتن برمیاید، قرار داشتن جسم در حالت آرامش و یا حرکت یکنواخت مستلزم تساوی برآیند نیروها با صفر است. بایستی نیروهای بالاگرا با نیروهای پائین‌گرا و نیروهای راست‌گرا با نیروهای چپ‌گرا متعادل باشند.

این اصل در مثال کنونی ما نیز با واقعیت مطابقت دارد. اگر چرخ طیار در حالت سکون قرار داشته باشد نیروهای موثر بر آن با نیروی واکنش محوری که چرخ بر آن نصب شده است متعادل میگردند. اما این شرط لازم در اینجا مکفی بودن خود را از دست میدهد، چونکه علاوه بر تعادل نیروها تعادل گشتاورهای نیرو نیز ضروری است: تعادل گشتاورها دومین شرط لازم برای آرامش و یا چرخش یکنواخت جسم جامد است.

گشتاور نیروها در صورت تعدد بسادگی بدو گروه تقسیم میشوند: گروهی که در صدد چرخش جسم براست است و گروهی که میکوشد جسم را بچپ بچرخاند. و این همان گشتاورهائی هستند که باید متعادل شوند.

اهرم

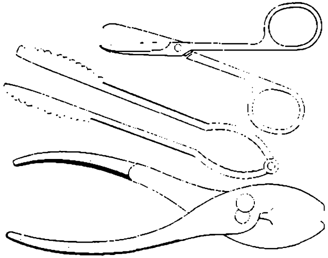
آیا انسان می‌تواند صد تن بار را در حالت آویختگی نگاه دارد؟ قادر است با دست آهن را له کند؟ و آیا کودکی امکان مقابله با پهلوانی را دارد؟ پاسخ مثبت است.

به شخص پرزوری پیشنهاد کنید چرخ طیاری را با گرفتن پره‌های آن درست از پهلوی محور بچپ بچرخاند. در این حالت گشتاور نیرو بزرگ نیست — نیرو زیاد ولی بازو کوتاه است. در صورتیکه کودکی پره‌ها را در نزدیکی حلقه چرخ بگیرد و آنرا بجهت مخالف چرخش بکشد بعید نیست که گشتاور بزرگ باشد، چون در اینحالت با وجود کمی نیرو بازو طویل است. شرط موازنه بقرار زیر است:

$$F_1 d_1 = F_2 d_2 \quad \text{یا} \quad \text{و} \quad M_1 = M_2$$

با استفاده از قانون گشتاورها میتوان به انسان نیروئی افسانه‌ای بخشید. مثال اهرم در اینجا بسیار گویاست. شما میتوانید سنگ عظیمی را با کمک دیلم بلند کنید، حتی اگر وزن سنگ چندین تن هم باشد. دیلم قرار داده شده بر تکیه‌گاه، همانا جسم جامد مسئله ما را تشکیل میدهد. نقطه اتکاء بعنوان مرکز چرخش محسوب میشود. در اینجا دو گشتاور بر جسم تاثیر میکنند: گشتاور نیروی مانع از طرف وزن سنگ و گشتاور نیروی محرک از جانب دست انسان. با انتساب علائم (۱) و (۲) به نیروی عضلاتی و سنگینی سنگ، شرط بلند کردن سنگ را می‌توان به اختصار اینطور معین ساخت: M_1 باید بیش از M_2 باشد. شرط بلند نگاه داشتن سنگ منوط به اینست که $M_1 = M_2$ یعنی $F_1 d_1 = F_2 d_2$ باشد.

اگر بازوی کوتاه تعیین‌کننده فاصله تکیه‌گاه تا سنگ، ۱۰ بار کوچکتر از بازوی دراز یعنی از تکیه‌گاه تا دست باشد شخص قادر



شکل ۵۱

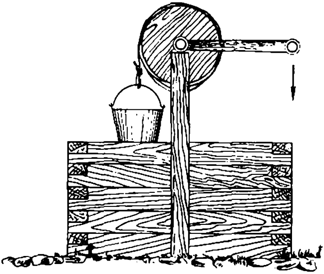
است سنگ یک تنی را در حالیکه با وزن خودش بر انتهای بازوی دراز فشار میآورد بلند نگاه دارد.

ساده‌ترین و در عین حال رایج‌ترین مثال اهرم را همین دیلم متکی بر تکیه‌گاه تشکیل میدهد. در این مورد میزان برد از نظر نیرو معمولاً ۱۰ تا ۲۰ بار است. طول دیلم در حدود ۱٫۵ متر است و نقطه اتکاء را مشکل بتوان نزدیکتر از ۱۰ سانتیمتر از انتهای آن گرفت. بدین ترتیب بازوی طویل از بازوی کوتاه ۱۵ تا ۲۰ بار درازتر خواهد بود و برد حاصله از نظر نیرو نیز معادل همین مقدار خواهد بود.

راننده با جک اتوموبیل چند تنی را به آسانی بلند میکند. جک اهرمی است از همان نوع دیلم واقع بر روی نقطه اتکاء. نقاط تاثیر نیروها (دست، وزن اتوموبیل) در دو طرف نقطه اتکاء اهرم جک واقعند. در اینجا برد از نظر نیرو معادل ۴۰ تا ۵۰ بار است که امکان بلند کردن وزن بزرگی را فراهم میسازد.

قیچی، فندق‌شکن، انبردست، گازانبر و بسیاری ابزارهای دیگر همه از انواع اهرمها محسوب میشوند. در شکل ۵۱ بسهولت میتوان مرکز چرخش جسم جامد (نقطه اتکاء) و نقطه تاثیر دو نیروی مانع و محرک را پیدا کرد.

وقتیکه با قیچی حلبی را می‌برند دوشاخه آنرا هرچه بیشتر باز میکنند. از این کار چه سودی حاصل میشود؟ روشن است که بازتر



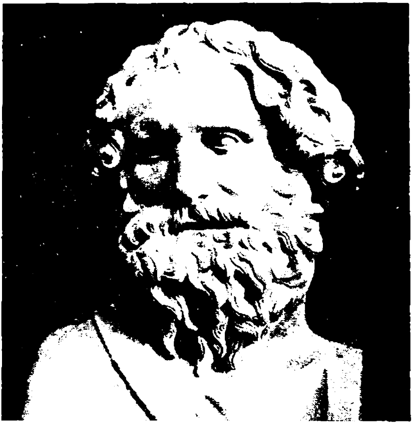
شکل ۵۲

شدن شاخه‌های قیچی امکان بیشتری برای نزدیکی حلبی به مرکز چرخش فراهم میسازد و در نتیجه بازوی گشتاور نیروی مقاوم کوتاه میشود و از نظر نیروی موثر برد حاصله فزونی می‌یابد. یک شخص بالغ با نیروئی معادل ۴۰ تا ۵۰ کیلوگرم دسته‌های قیچی یا گازانبر را فشار میدهد. با در نظر گرفتن اینکه یک بازو از بازوی دیگر می‌تواند تا ۲۰ بار بزرگتر باشد، در اینصورت ورقه فلزی را می‌توان با نیروئی در حدود یک تن برید و آنهم بکمک ابزاری بدین سادگی. چرخ چاه نیز یکی از انواع اهرمها را تشکیل میدهد. در بسیاری از روستاها بکمک چرخ از چاه آب میکشند (تصویر ۵۲).

باخت از نظر مسافت

ابزارها به انسان نیرو می‌بخشند، ولی از این امر بهیچوجه نتیجه نمیشود که میتوان در ازای مصرف کار کم بدریافت کار زیادی نائل آمد. قانون بقای انرژی گواه بر آنست که برد در کار یعنی ایجاد کار از «هیچ» امری است ناممکن.

کار دریافتی ممکن نیست بیشتر از کار مصروفه باشد. برعکس، ناگزیری ضایعات حاصله از اصطکاک باعث میشود که همیشه کار دریافتی از کار مصروفه کمتر است. در شرائط ایده‌آل این دو کار با یکدیگر برابر خواهند بود.



ارشمیدس (در حدود سال ۲۸۷ تا ۲۱۲ ق. م.) — بزرگترین ریاضیدان و فیزیکدان ازمنه قدیم است. ارشمیدس بمحاسبه حجم و سطح کره و اجزاء آن، استوانه و اجسام منتجه از دوران بیضی، هذلولی و شلجمی پرداخت. او برای اولین بار با دقت درخور توجهی نسبت پیرامون دایره به قطر آنرا حساب کرد و حدود آنرا نشان داد: $3\frac{10}{71} < \pi < 3\frac{1}{7}$. در مکانیک، او قوانین اهرمها، شرائط شناوری اجسام («قانون ارشمیدس») و قاعده جمع نیروهای موازی را پیدا کرد. ارشمیدس ماشین برای بالا کشیدن آب («مارپیچ ارشمیدس» در زمان ما هم برای حمل بارهای ریختنی و گرانرو بکار برده میشود)، سیستم اهرمها و قرقره‌ها برای جراثقال و دستگاههای جنگی پرتاب وزنه را ابداع نمود که هنگام محاصره موطن وی سیراکوس از طرف اهالی شهر بر علیه رومیها موفقانه مورد استفاده قرار گرفت.

در واقع ما در اینجا بیهوده به توضیح این واقعیت مسلم می‌پردازیم، زیرا قاعده گشتاورها از شرط تساوی کار نیروهای موثر و مقاوم بدست آمده بود.

در صورتیکه نقاط تاثیر نیروها مسافاتی معادل s_1 و s_2 را طی کرده باشند، شرط برابری دو کار را بایستی اینطور نوشت:

$$F_1^{\text{طولی}} \times s_1 = F_2^{\text{طولی}} \times s_2$$

بکار بردن ابزار اهرمی برطرف ساختن مقاومت نیروی F_2 در طول راه s_2 را با صرف نیروی F_1 که بمراتب کمتر از F_2 می‌باشد، میسر میسازد. ولی تغییر مکان دست s_1 باید بهمان نسبت که F_1 از F_2 کوچکتر است، بیشتر از s_2 باشد.

اغلب این قانون را در جمله زیر خلاصه میکنند: برد از نظر نیرو معادل باخت از لحاظ مسافت است.

قاعده اهرم را یکی از بزرگترین دانشمندان ازمنه قدیم — ارشمیدس کشف کرد. این دانشمند برجسته عهد باستان، در حالیکه شیفته براهین خود شده بود، به پادشاه سیراکوز «هرون» نوشت: «اگر کره زمین دیگری وجود داشت من بدانجا میرفتم و کره زمینمان را از جا تکان میدادم». ظاهراً اهرم بسیار درازی که نقطه اتکاء آن بکره زمین نزدیک بود اینکار را برایش میسر میساخت.

البته ما با ارشمیدس در باره این مسئله که نقطه اتکائی که وی بخیال خود برای جابجا کردن کره زمین کم داشت فاقد وجود خارجی است افسوس نخواهیم خورد.

در عالم پندار اهرمی با استحکام خارق‌العاده را که بر روی تکیه‌گاهی قرار دارد مجسم کنیم. به انتهای کوتاهتر آن «گلوله کوچکی» را بیاویزیم که وزنش 6×10^{24} kgf است. این رقم «ناچیز» همان وزن کره زمین است که در این «گلوله کوچک» فشرده شده است. حال انتهای طویل اهرم را در معرض تاثیر نیروی عضلانی قرار میدهیم.

اگر نیروی بازوی ارشمیدس را ۶۰ kgf حساب کنیم برای یک سانتیمتر جابجا کردن «فندقک که اسمش کره زمین است» دست وی

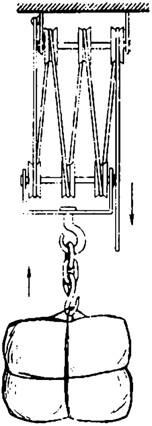
باید مسافتی برابر $\text{cm}\ ۱۰^{۲۳} = \frac{۶ \times ۱۰^{۲۴}}{۶۰}$ را بهپیماید. **$\text{cm}\ ۱۰^{۲۳}$** برابر $۱۰^{۱۸}$ کیلومتر میشود که رقمی است سه میلیارد بار بیشتر از قطر مدار زمین. این مثال پنداری بروشنی مقیاس «باخت در مسافت» را ضمن استفاده از اهرم نشان میدهد.

هر یک از مثالهای بررسی شده در بالا را میتوان بعنوان نمودار نه‌تنها برد در نیرو بلکه باخت در مسافت نیز مورد ارزیابی قرار داد. مسافت طی شده بوسیله دست راننده اتوموبیل در حین بحرکت درآوردن جک، بهمان نسبت وزن اتوموبیل به نیروی عضلانی او بیشتر از اندازه بلند شدن اتوموبیل بوسیله جک است. ضمن حرکت دسته‌های قیچی برای بریدن ورقه حلبی برتری دارد کار مصروفه در مسافتی انجام میگیرد که بهمان نسبت کسری نیروی عضلات از مقاومت حلبی، بیشتر از طول برش است. سنگی که بوسیله دیلم بلند میشود نیز بهمان نسبت نیروی عضلات از وزنش کمتر است. کمتر از تغییر مکان دست بسوی پائین، بالا میرود. این اصل شیوه تاثیر پیچ را روشن میسازد. فرض کنیم پیچ مهره‌داری با پای یک میلیمتری را بکمک آچار ۳۰ سانتیمتری می‌پیچانیم. با یک دور چرخش پیچ فقط باندازه یک میلیمتر جابجا میشود، در حالیکه دست ما در همین مدت ۲ متر مسافت طی کرده است. برد در نیرو در اینجا دوهزار بار است که به ما امکان میدهد یا بطور مطمئنی قطعات مورد نظر را بهم متصل سازیم و یا با حرکات سبک دست سنگینیی های بزرگی را جابجا کنیم.

ماشینهای بسیار ساده دیگر

باخت در مسافت بعنوان باز پرداخت برد در نیرو قانون عمومی نه تنها ابزار اهرمی بلکه هر وسیله و مکانیسمی است که بوسیله انسان مورد استفاده قرار میگیرد.

برای بلند کردن بار وسائل بالابر قرقره‌ای بصورت گسترده‌ای بکار برده میشوند که معمولاً مرکب از مجموعه چند قرقره و قلاویز متحرک متصل به یک یا چند جعبه قرقره بیحرکت می‌باشند. در شکل ۳۰ محموله‌ای از شش طناب آویزان شده است. بدیهی است که در اینصورت



شکل ۵۳

وزن تقسیم میشود و کشش طناب شش بار از وزن کمتر خواهد شد و برای بالا بردن یک تن بار نیروئی برابر $\frac{۱۰۰۰}{۶} = ۱۶۷$ kgf لازم خواهد بود اما فهم این موضوع مشکل نیست که برای بلند کردن بار تا ارتفاع یک متری باید باندازه شش متر طناب را کشید. خلاصه برای بلند کردن بار تا ارتفاع یک متر ۱۰۰۰ kgfm کار لازم است. این کار بهر شکل که شده باید تامین شود. نیروی $\frac{۱۰۰۰}{۶}$ kgf کیلوگرمی باید در مسافت شش متر تاثیر کند و نیروی ۱۰ kgf در مسافت ۱۰۰ متری و نیروی یک kgf در مسافت هزار متری و الخ...

سطح متمایلی که در صفحه ۳۱ به آن اشاره شد نیز وسیله‌ای است برای امکان برد در نیرو ضمن باخت در مسافت.

ضربه نیز نوع ویژه‌ای از افزایش نیروست. ضربه چکش، تبر، منجنیق و حتی ضربه مشت میتوانند نیروئی بزرگ بیافرینند فهم رمز ضربه محکم دشوار نیست. برای کوبیدن میخ با چکش در دیواری سخت باید آنطور که شاید دست را بعقب برد. دامنه زیاد که بمعنی بعد طولانی تاثیر نیروست موجب تولید انرژی سینتیک قابل ملاحظه‌ای بوسیله چکش خواهد شد. انتقال این انرژی در مسافت کمی انجام میگیرد. مثلاً، اگر دامنه ضربه $\frac{۱}{۲}$ متر باشد و میخ باندازه $\frac{۱}{۲}$ سانتیمتر داخل دیوار شود، در اینصورت نیرو صد چندان شده است. اما اگر دیوار سخت تر باشد و میخ با همان دامنه ضربه تنها $\frac{۱}{۲}$ میلیمتر داخل شود ضربه ده بار از دفعه اول محکمتر خواهد بود. در دیوار سخت میخ زیاد فرو نمیرود و همان کار در مسافت کمتری مصرف میشود. معلوم

میشود که چکش مثل یک خودکار عمل میکند یعنی هرجا سفت‌تر باشد محکم‌تر میکوبد.

اگر چکش یک کیلوگرمی دور بردارد نیروی ضربه وارده بر میخ ۱۰۰ kgf خواهد بود. در هنگام شکستن هیزم با تبر سنگین نیروی وارده معادل چندین تن است. پتک‌های سنگین آهنگری از ارتفاع کمی پائین میافتند — حدود یک متر. اگر فرضاً پولاد گداخته تنها یکی دو میلیمتر پهن شود و وزن پتک یک تن باشد ضربه با نیروئی عظیم که معادل هزاران تن است وارد میاید.

چگونه نیروهای موازی وارد بر جسم جامد را میتوان جمع بست.

در صفحات قبل ما با تعویض مجازی جسم با نقطه مادی حل مسائل را که در آنها جمع نیروها طلب میشد آسان کرده بودیم قاعده متوازی‌الاضلاع بسهولت پاسخ مسئله را بدست میداد و اگر نیروها موازی بودند ما آنها را مانند اعداد جمع می‌بستیم.

اکنون قضیه مشکل‌تر است، چون تاثیر نیرو بر شیئی نه‌تنها بوسیله کمیت و جهت آن، بلکه از طریق نقطه اثر آن، یا چنانکه در بالا توضیح داده شد بوسیله راستای نیرو که معادل آنست مشخص میشود.

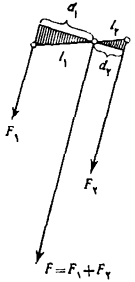
جمع بستن نیروها، یعنی تعویض آنها با یک نیرو، و این همیشه ممکن نیست.

تعویض نیروهای موازی با یک نیروی منتجه مسئله‌ایست پیوسته قابل اجرا (بغیر از یک مورد استثنائی که در باره آن در پایان این مبحث سخن خواهیم گفت). در اینجا جمع بستن نیروهای موازی را مورد بررسی قرار میدهیم. بدیهی است که در صورت همسو بودنشان حاصل جمع دو نیروی سه و پنج کیلوگرمی مساوی هشت کیلوگرم خواهد بود. مطلب بر سر یافتن نقطه اثر نیروی منتجه است.

در شکل ۵٤ دو نیروی وارد بر جسم ترسیم شده است. جمع نیروها F، نیروهای F_1 و F_2 را تعویض میکند، ولی این بدانمعنی نیست که تساوی $F = F_1 + F_2$ کافی است. تاثیر نیروی F تنها در موردی معادل تاثیرات دو نیروی F_1 و F_2 است که گشتاور

نیروی F مساوی مجموع گشتاورهای نیروهای F_1 و F_2 باشد.

راستای جمع نیروها F که ما در جستجویش هستیم البته با نیروهای F_1 و F_2 موازی است، ولی در چه فاصله‌ای از این نیروها قرار گرفته است؟



شکل ۵۴

در شکل نقطه اثر نیروی F در نقطه‌ای واقع بر پاره خطی که نقاط تاثیر نیروهای F_1 و F_2 را بهم وصل میکند مشخص گردیده است. بدیهی است که گشتاور نیروی F نسبت به نقطه منتخب برابر صفر است. پس جمع گشتاورهای نیروهای F_1 و F_2 نسبت به این نقطه نیز بایستی مساوی صفر باشد، و این در صورتی ممکن است که گشتاور نیروهای F_1 و F_2 از لحاظ کمیت مساوی و مختلف‌العلامت باشند.

حال اگر بازوی نیروهای F_1 و F_2 را با حروف d_1 و d_2 نشان دهیم شرط بالا را بصورت زیر می‌توان نوشت:

$F_1 d_1 = F_2 d_2$ یعنی $\frac{F_1}{F_2} = \frac{d_2}{d_1}$.

از تشابه مثلث‌های هاشورزده نتیجه میشود که $\frac{d_2}{d_1} = \frac{l_2}{l_1}$ می‌باشد، یعنی نقطه اثر جمع نیروها بر روی پاره خط واصل دو نیرو طوری قرار میگیرد که فاصله بین نیروهای جمع شونده را به قسمت‌های l_1 و l_2 به نسبت عکس نیروها تقسیم کند.

فاصله بین نقاط اثر نیروهای F_1 و F_2 را با l نشان میدهیم. در اینصورت روشن است که

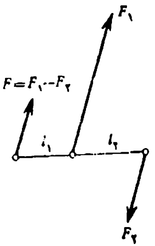
$$l = l_1 + l_2$$

سیستم دو معادله دو مجهولی را حل میکنیم

$$\begin{cases} F_1 l_1 - F_2 l_2 = 0 \\ l_1 + l_2 = l \end{cases}$$

در نتیجه

$$l_1 = \frac{F_2 l}{F_1 + F_2} \quad و \quad l_2 = \frac{F_1 l}{F_1 + F_2}$$



شکل ۵۵

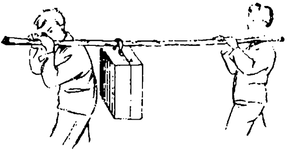
از روی این فرمولها می‌توان نقطه اثر نیروی منتجه را نه تنها در صورت همسو بودن نیروها، بلکه در حالت مخالف بودن جهات آن ها (باصطلاح انتی‌پارالل) نیز بیابیم. نیروهای ناهمسو علائم مختلف دارند، لذا نیروی منتجه آنها بجای جمع مساوی تفاضل آنها $F_1 - F_2$ خواهد بود. حال اگر نیروی کمتر F_2 را منفی انگاریم، بر طبق فرمولهای فوق مشاهده می‌کنیم که l_1 منفی میباشد. پس نقطه اثر نیروی F_1 نه در سمت چپ (مثل سابق) بلکه در سمت راست نقطه اثر نیروی منتجه (شکل ۵۵) قرار گرفته است. ضمناً مانند قبل:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}$$

در مورد نیروهای آنتی‌پارالل و مساوی نتیجه جالبی بدست میآید. در این حالت $F_1 + F_2 = 0$ خواهد بود، و بر طبق فرمولهای فوق l_1 و l_2 بی‌نهایت بزرگ میشوند. این مطلب دارای چه معنای فیزیکی است؟ چون انتقال نیروی منتجه به بی نهایت فاقد معناست. نیروهای آنتی‌پارالل و مساوی با یک نیرو تعویض ناپذیراند. سیستم چنین نیروهائی را جفت نیرو می‌نامند.

تاثیر جفت نیرو را نمی‌توان با تاثیر یک نیرو نشان داد. هر دو نیروی موازی و یا آنتی‌پارالل را می‌توان با یک نیرو متعادل ساخت، مگر جفت نیرو که درباره آن اینکار عملی نیست.

البته درست نبود اگر بگوئیم که دو نیروی سازنده جفت نیرو یکدیکر را خنثی میسازند. جفت نیرو دارای تاثیری است بسیار اساسی و جسم را بچرخش در میآورد. ویژگی جفت نیرو در آنست که موجب حرکت انتقالی نمیشود.



شکل ٥٦

در برخی موارد ممکن است نه جمع نیروهای موازی، بلکه تجزیه نیروی مفروضی به دو نیروی موازی مطلوب باشد.
در شکل ٥٦ دو نفر مجسم شده‌اند که با هم چمدان سنگینی را بر روی چوبی حمل میکنند. وزن چمدان بین این دو نفر تقسیم میشود. در صورتیکه بار به وسط چوب فشار آورد هر دو نفر سنگینی یکسانی را متحمل میشوند. اگر فاصله بین نقطه اتکاء بار و دستهای حامل آن d_1 و d_2 باشد، نیروی F بر اساس قاعده زیر بدو نیروی F_1 و F_2 تقسیم میشود:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{d_2}{d_1}$$

کسی که قوی‌تر است باید چوب را نزدیک‌تر به نقطه اتکاء بار بگیرد.

مرکز ثقل

کلیه اجزاء جسم دارای وزن می‌باشند. از اینرو جسم جامد تحت تاثیر تعداد بی‌نهایت نیروی ثقل قرار دارد که با یکدیگر موازیند. اگر چنین است پس بر حسب قاعده‌ای که هم اکنون مورد بررسی قرار گرفت، مجموع آنها را می‌توان با یک نیرو تعویض نمود. نقطه اثر جمع نیروها را مرکز ثقل می‌خوانند. در این نقطه گوئی تمام وزن جسم متمرکز شده است.
جسمی را از یکی از نقاطش آویزان میکنیم. جسم چه وضعی بخود خواهد گرفت؟ از آنجا که ما می‌توانیم ذهناً جسم را با بار متمرکز

در مرکز ثقل آن تعویض کنیم، روشن است که در حالت موازنه این بار بر رویخط قائمی که از نقطه اتکاْ میگذرد جا خواهد گرفت. بعبارت دیگر در حالت موازنه مرکز ثقل در پائین‌ترین موضع قائمی که از نقطه اتکاْ میگذرد قرار میگیرد.

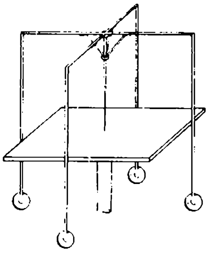
ممکن است مرکز ثقل را بر روی خط قائم گذرا از محور، بالای نقطه اتکاْ قرار داد. اما باید متذکر شد که این کار بسختی و تنها بعلت وجود نیروی اصطکاک میسر میشود. البته چنین موازنه‌ای پایدار هم نیست. شکلی را از مقوا می‌بریم. برای یافتن مرکز ثقل آن دو بار آنرا با چسباندن نخی به دو نقطه مختلفش آویزان می‌کنیم. سپس شکل را با محور گذرا از مرکز ثقل آن مستحکم ساخته و آنرا در حالات گوناگون بچرخش در میاوریم. مشاهده میکنیم که جسم نسبت به تمام اقدامات ما بی‌تفاوت میماند. در هر وضعی حالت مخصوص موازنه تکرار میشود که بهمین سبب آنرا موازنه بی‌تفاوت میخوانند.

علت این امر معلوم است — در کلیه اوضاع شکل، نقطه مادی جانشین شونده آن محل خود را تغییر نمیدهد. در برخی موارد مرکز ثقل را حتی می‌توان بدون تجربه و یا محاسبه تعیین کرد. مثلاً واضح است که مرکز ثقل کره، حلقه، مربع، مستطیل در مراکز این اشکال قرار دارد، زیرا این اجسام متقارنند اگر ذهناً جسم متقارنی را خرد کنیم، هر ذره از آن با ذره دیگری که متقارن آن بوده و در سمت دیگری از مرکز قرار گرفته است تطابق خواهد داشت. برای هر جفت این ذرات مرکز شکل مرکز ثقل خواهد بود.

در مورد مثلث مرکز ثقل در نقطه تقاطع میانه‌ها قرار دارد. اگر مثلث را به نوارهای باریکی بموازات یکی از اضلاع آن تقسیم کنیم، میانه یکایک نوارها را از وسط نصف خواهد کرد. اما مرکز ثقل نوار البته در وسط آن قرار دارد، یعنی بر روی میانه. چون مراکز ثقل تمام نوارها باید بر روی میانه قرار گیرند و این مطلب در باره هر سه میانه صادق است، پس مرکز ثقل مثلث باید در نقطه تقاطع آنها باشد.

شاید شما مطمئن نباشید که هر سه میانه در یک نقطه متقاطعند. این قضیه‌ایست که در هندسه ثابت میشود ولی بحث ما نیز غیر مستقیم این امر را باثبات میرساند. از آنجا که جسم نمی‌تواند بیش

از یک مرکز ثقل داشته باشد و چون مرکز ثقل واحد صرفنظر از راس استخراج میانه بر روی آن قرار دارد این نتیجه حاصل میشود که هر سه میانه در یک نقطه یکدیگر را قطع میکنند. بدینسان مسئله فیزیکی در اثبات قضیه هندسی بما یاری رساند.



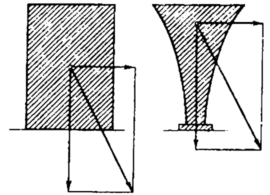
شکل ۵۷

یافتن مرکز ثقل مخروط متجانس مشکل‌تر است. فقط از روی تقارن روشن است که مرکز ثقل باید بر روی خط محور قرار داشته باشد. محاسبه نشان میدهد که مرکز ثقل در فاصله‌ای باندازه $\frac{۱}{۴}$ ارتفاع بالاتر از سطح قاعده قرار دارد.

الزامی ندارد که مرکز ثقل همیشه درون جسم باشد. مثلاً، مرکز ثقل حلقه در مرکز آن که خارج از حلقه است واقع می‌باشد.

آیا میتوان سنجاقی را بر سطح صاف شیشه‌ای بحالت قائم نگاه داشت؟ در شکل ۵۷ طرز اجرای این کار نشان داده شده است. اسباب کوچکی از سیم بشکل دو شاهین ترازو که صلیب‌وار بهم متصل شده باشند با چهار وزنه کوچک آویزان بر آنرا بایستی محکم به سنجاق وصل نمود. چون محل آویزش وزنه‌ها پائین‌تر از نقطه اتکاء سنجاق بوده و وزن سنجاق ناچیز است، مرکز ثقل پائین‌تر از نقطه اتکاء قرار خواهد گرفت و حالت موازنه پایدار خواهد ماند.

تاکنون از اجسام متکی بر نقطه سخن میرفت. حال ببینیم در مورد جسم متکی بر سطح وضع از چه قرار خواهد بود؟ واضح است که در این مورد قرار داشتن مرکز ثقل بالاتر از محل اتکاء دال‌بر ناپایداری موازنه نیست. در غیر اینصورت چگونه میشد استکانی را روی میز نهاد؟ در اینجا برای پایداری موازنه تنها لازم است که راستای نیروی ثقل گذرا از مرکز ثقل از سطح اتکاء عبور کند. برعکس اگر راستای نیروی ثقل خارج از سطح اتکاء قرار گیرد جسم سرنگون خواهد شد.



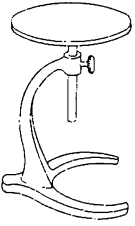
شکل ۵۸

میزان پایداری موازنه بسته به ارتفاع مرکز ثقل از تکیه‌گاه می‌تواند بسیار مختلف باشد. استکان چای را تنها شخص بی‌احتیاطی می‌تواند بیاندازد در حالیکه گلدان پایه کوچک تنها با تماس کوچکی واژگون میشود. علت چیست؟

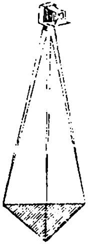
به شکل ۵۸ نگاه کنید. یک نیروی واحد واژگون کننده ضمن جمع شدن با نیروی ثقل نیروی منتجه‌ای را ببار میآورد که در صورت پائین بودن مرکز ثقل جسم را به تکیه‌گاه میفشارد و در وضعی که مرکز ثقل بالا قرار گرفته باشد از سطح اتکاء نگذشته و کنار میرود.

ما گفتیم که برای پایداری جسم نیروی موثر بر آن باید از سطح اتکاء بگذرد، ولی سطح اتکاء لازم برای موازنه همیشه با سطح اتکاء واقعی منطبق نیست. شکل ۵۹ جسمی را نشان میدهد که اتکاء آن هلال مانند است. بآسانی میتوان فهمید که پایداری جسم در صورت تکمیل هلال تا حد نیمدایره تغییری نمی‌یابد. بدینسان سطح اتکاء تعیین کننده شرط موازنه ممکن است بیشتر از میزان واقعی آن باشد.

برای یافتن سطح اتکاء سه‌پایه‌ای که در شکل ۶۰ نشان داده شده است بایستی نقاط انتهائی آنرا با خطوطی بهم وصل‌نمود. چرا روی بند راه رفتن اینقدر مشکل است؟ زیرا که سطح اتکاء بشدت کاهش می‌یابد. بیخود نیست که بندباز ماهر همواره با کف‌زدنهای تماشاچیان روبرو میشود. اما باید گفت که تماشاچیان گاه دچار خطا شده و حقه‌های تردستیهای بندباز را که موجب تسهیل کار اوست، بعنوان اوج مهارت وی تلقی میکنند. بندباز شاهین دارای انحناء بزرگ که بدو انتهایش دو سطل آب آویزان شده را گرفته، و در حالیکه سطلها در سطح طناب قرار دارند، با چهره‌ای جدی در حالیکه ارکستر برای لحظاتی



شکل ۵۹



شکل ۶۰

خاموش میشود از روی طناب میگذرد و تماشاچی بی‌تجربه را بحیرت میاندازد. ولی در واقع بندباز با پائین آوردن مرکز ثقل کار خود را آسان کرده است.

مرکز اینرسی

بنظر میاید که طرح چنین سئوالی کاملاً منطقی باشد: مرکز ثقل گروهی از اجسام در کجا واقع است؟ اگر بر روی طراده‌ای عده زیادی جمع شده باشند ثبات آن به مرکز ثقل مشترک (سرنشینها و طراده) مربوط خواهد بود.

در اینجا باز همان مفهوم سابق دست نخورده بجا ماند: — مرکز ثقل عبارتست از نقطه اثر مجموع نیروهای ثقل کلیه اجسام گروه مورد بررسی.

برای دو جسم نتیجه محاسبه بر ما معلوم است. اگر دو جسم با وزنهای F_1 و F_2 در فاصله x از یکدیگر قرار گرفته باشند، مرکز ثقل در فواصل x_1 و x_2 از اجسام اول و دوم واقع خواهد شد، ضمناً $x = x_1 + x_2$ و $\frac{F_1}{F_2} = \frac{x_2}{x_1}$ خواهد بود.

چون وزن را می‌توان بعنوان حاصلضرب mg محسوب داشت، مرکز ثقل دو جسم از معادله زیر بدست میاید:

$$m_1 x_1 = m_2 x_2$$

یعنی مرکز ثقل در نقطه‌ای واقع شده است که فاصله بین اجرام را به دو پاره خط به نسبت معکوس اجرام آنها تقسیم میکند.

اینک تیراندازی با توپ واقع بر روی سکو را بخاطر بیاوریم. مقادیر حرکت توپ و گلوله با یکدیگر مساوی و ناهمسویند، یعنی:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{m_1}{m_2} \text{ یا } m_1 v_1 = m_2 v_2$$

ضمناً باید متذکر شد که نسبت سرعتها در تمام طول زمان تاثیر متقابل ثابت میماند و چنانکه از رابطه فوق برمیآید مساوی $\frac{m_1}{m_2}$ است. توپ و گلوله در حین حرکتی که بعلت بازده ایجاد میشود نسبت به مواضع اولیه خود در جهات مخالف بفواصل x_1 و x_2 تغییر مکان میدهند. فواصل x_1 و x_2 یعنی مسافت پیموده شده بوسیله هر دو جسم تدریجاً افزایش می‌یابند، ولی با در نظر گرفتن ثبات نسبت سرعتها، نسبت مقادیر x_1 و x_2 بیکدیگر نیز ثابت مانده و مساوی همان $\frac{m_1}{m_2}$ خواهد بود، یعنی

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{m_1}{m_2}$$

یا

$$x_1 m_1 = x_2 m_2$$

در اینجا x_1 و x_2 فواصل توپ و گلوله از مواضع اولیه آنهاست. حال اگر این فرمول را با فرمولی که موقعیت مرکز ثقل را معین میکند مقایسه کنیم همانندی کامل آنها را در میابیم. از اینجا مستقیماً استنباط میشود که مراکز ثقل گلوله و توپ بعد از تیراندازی هم در همان نقاط اولیه خود باقی میمانند.

بسخن دیگر ما به نتیجه بسیار جالبی رسیدیم — مراکز ثقل توپ

و گلوله پس از تیراندازی در سکون خواهند ماند. چنین نتیجه‌ای همواره صحیح است. اگر مراکز ثقل دو جسم از اول در حالت سکون باشد، تاثیر متقابل آنها صرفنظر از کیفیت خود قادر به تغییر موقعیت مراکز ثقل نیست. همانا از این روست که نمی‌شود شخص با گرفتن و کشیدن موهایش بتواند خود را بلند کند. و یا آنطور که نویسنده فرانسوی «سیرانو دوبرژراک» بشوخی پیشنهاد میکرد بتوان بمنظور رسیدن بکره ماه تکه آهنی را بدست گرفته و با بالا انداختن مکرر آهن‌ربائی که همواره آهن را بسوی خود خواهد کشید به اوج آسمان صعود نمود.

از دیدگاه سیستم اینرسیال دیگری، مرکز ثقل ساکن بطور یکنواخت در حرکت خواهد بود. پس مرکز ثقل یا در حالت سکون است و یا یکنواخت و مستقیم حرکت میکند.

آنچه در باره مراکز ثقل دو جسم گفته شد در مورد گروه اجسام متعدد نیز صادق است. البته برای گروه اجسام مجزا ضمن کاربرد قانون بقای مقدار حرکت همیشه این موضوع را قید میکنیم.

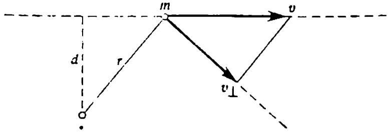
پس هر گروه اجسام متقابلاً موثر بر یکدیگر دارای نقطه‌ای هستند که یا ساکن بوده و یا در حرکتی یکنواخت است و این همان مرکز ثقل آنها می‌باشد.

با دادن نام دیگری یعنی مرکز اینرسی به این نقطه خصوصیت جدید آن مورد تاکید قرار میگیرد، چون مثلاً در باره ثقل منظومه شمسی (و بالنتیجه در باره مرکز ثقل آن) تنها بنحو مشروطی میتوان سخن گفت.

صرفنظر از طرز حرکت اجسام یک گروه مسدود، مرکز اینرسی (ثقل) یا در حالت سکون قراردارد و یا از نظر سیستم محاسبه دیگری از روی اینرسی در حرکت خواهد بود.

گشتاور چرخنده

اکنون با یکی دیگر از مفاهیم مکانیک آشنا میشویم. این مفهوم فرمولبندی قانون مهم حرکت را که برای ما تازگی دارد ممکن میسازد و بنام گشتاور چرخنده یا گشتاور ضربه و یا گشتاور مقدار حرکت



شکل ۶۱

خوانده میشود. همین اسامی این گشتاور خود بیانگر آنست که در اینجا از کمیتی سخن میرود که از پاره‌ای جهات به گشتاور نیرو شبیه است.

گشتاور مقدار حرکت نیز مانند گشتاور نیرو به نقطه‌ای که گشتاور نسبت بدان تعیین میشود نیازمند است. برای تعیین گشتاور مقدار حرکت نسبت به نقطه دلخواه، باید مقدار حرکت را ترسیم نمود و از نقطه مزبور عمودی بر راستای بردار فرود آورد (شکل ۶۱). حاصلضرب مقدار حرکت mv در بازوی d، گشتاور مقدار حرکت را که با حرف N نشان داده میشود تشکیل میدهد:

$$N = mvd$$

اگر جسم آزادانه حرکت کند سرعتش تغییر نمی‌یابد و بازو نیز نسبت بهر نقطه برگزین شده ثابت میماند، زیرا حرکت در مسیر مستقیم انجام میگیرد. بنابر این گشتاور مقدار حرکت نیز درچنین حرکتی بدون تغییر باقی میماند.

برای گشتاور چرخنده همانند مورد گشتاور نیرو میتوان فرمول دیگری را نوشت. نقطه استقرار جسم‌را با شعاعی به نقطه‌ای که گشتاور نسبت بدان باید تعیین شود وصل میکنیم (شکل ۶۱). تصویر سرعت بر جهت عمود بر شعاع را ساخته و از تشابه مثلثهای ایجاد شده بدین نتیجه میرسیم که $\frac{v}{v_\perp} = \frac{r}{d}$ است. از تساوی $vd = v_\perp r$ برمیاید که گشتاور چرخنده را بشکل زیر نیز می‌توان نوشت:

$$N = mv_\perp r$$

چنانکه هم اکنون خاطرنشان کردیم، در حالت حرکت آزاد گشتاور چرخنده بی‌تغییر میماند. حال اگر جسم تحت تاثیر نیروئی قرار گیرد چطور؟ محاسبه نشان میدهد که مقدار تغییر گشتاور چرخنده در یک ثانیه مساوی گشتاور نیروست.

قانون بدست‌آمده در بالا را بدون زحمت میتوان بر سیستم اجسام نیز تعمیم داد. اگر تغییرات گشتاورهای چرخنده تمام اجسام داخل سیستم را رویهم بگذاریم، حاصل جمع مساوی جمع گشتاورهای نیروهای موثر بر این اجسام خواهد شد. لذا برای گروه اجسام این اصل صادق است: تغییر گشتاور منتجه مقدار حرکت در واحد زمان مساوی جمع گشتاورهای تمام نیروهاست.

قانون بقای گشتاور چرخنده

اگر دو سنگ را با طنابی بیکدیگر ببندیم و با قوت یکی از سنگها را پرتاب کنیم سنگ دیگر متصل به طناب نیز کشیده شده و در پی آن به پرواز در خواهد آمد. یک سنگ به سنگ دیگر سبقت خواهد گرفت و پیشروی آنها با چرخش توام خواهد بود. بیائیم از نیروی جاذبه چشم بپوشیم و فرض کنیم که پرتاب در فضای بین سیارات انجام گرفته است.

نیروهای وارده بر سنگها مساوی و در امتداد طناب خلاف جهت همدیگر میباشند (چون نیروهای کنش و واکنش هستند). لذا بازوهای هر دو نیرو نیز نسبت بهر نقطه دلخواه یکسان می‌باشند. بازوهای برابر و نیروهای برابر ولی در جهات معکوس گشتاورهائی برابر و دارای علائم مخالف بدست میدهند.

گشتاور نیروی برایند مساوی صفر خواهد بود. منتها از اینجا چنین نتیجه میشود که تغییر گشتاور چرخنده نیز برابر صفر است، یعنی اینکه گشتاور چرخنده چنین سیستمی ثابت میماند.

در مثال فوق طناب فقط برای تجسم بیشتر بکار آمد. اصولاً قانون بقای گشتاور چرخنده برای هر زوج اجسام موثر بر یکدیگر، صرفنظر از خصلت این تاثیر متقابل صادق است. و این تنها برای یک زوج

نیست. اگر سیستم مسدود اجسام مورد مطالعه قرار گیرد، نیروهای موثر بین اجسام را همیشه میتوان به تعداد مساوی نیروهای کنش و واکنش تقسیم نمود که گشتاورهای آنها دو بدو خنثی شوند.

قانون بقای گشتاور برآیند چرخنده جنبه عام دارد و برای تمام سیستمهای مسدود اجسام صادق است.

در صورت چرخش جسم بدور محور، گشتاور چرخنده آن برا- است با:

$$N = mvr$$

در اینجا m جرم، v سرعت و r فاصله از محور است. اگر سرعت‌را با تعداد دور در ثانیه (n) بیان کنیم، خواهیم داشت:

$$N = ۲\pi mnr^۲ \quad \text{و} \quad v = ۲\pi nr$$

یعنی گشتاور چرخنده متناسب است با مجذور فاصله از محور.

روی صندلی با نشیمنگاه چرخان بنشینید، وزنه‌های سنگینی بدست بگیرید، دستها را کاملاً از هم باز کرده و از کسی خواهش کنید شما را بآرامی بچرخاند. اگر ضمن چرخش با حرکت سریعی دستهارا بسینه بفشارید، سرعت چرخش شما بطور غیر منتظره‌ای رو به افزایش خواهد گذاشت. با باز کردن مجدد دستها حرکت کند خواهد شد و با فشردن مجدد آنها به سینه تسریع خواهد یافت. تا لحظه‌ای که صندلی شما در اثر اصطکاک از حرکت باز نایستاده، شما باین ترتیب موفق خواهید شد چند بار سرعت چرخش را تغییر دهید.

علت چیست؟

اگر بهنگام نزدیکی وزنه‌ها بمحور که با فشردن دستها بسینه عملی میشود، تعداد دور ثابت میماند، گشتاور چرخنده کاهش مییافت. برای «جبران» همین کاهش است که سرعت چرخش افزون میگردد.

آکروباتها با مهارت از این قانون بقای گشتاور چرخنده استفاده میکنند. چطور آکروبات «معلق» میزند؟ قبل از هر چیز کار با خیز برداشتن از پیش تخته فنری و یا از دست همبازی شروع میشود. هنگام خیز برداشتن بدن بجلو متمایل میشود و وزن همراه با نیروی خیز گشتاور نیروئی آنی بوجود میاورد. نیروی خیز سبب حرکت

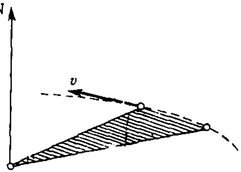
بجلو و گشتاور نیرو موجب چرخش میشود. اما سرعت آن کافی نیست و تماشاچی را چندان تحت تاثیر قرار نمیدهد. از اینرو آکروبات زانوها را خم میکند و بسینه میفشارد و باین ترتیب با جمع کردن بدن خود و نزدیک کردن هر چه بیشتر آن به محور چرخش بمیزان قابل توجهی بر سرعت چرخش خود میافزاید و تند معلق میزند. چنین است مکانیسم معلق.

حرکت رقاصه های باله، آنگاه که به دورانهای سریع پشت سر هم می‌پردازند نیز از همین جا ناشی است. معمولاً گشتاور چرخنده اولیه بوسیله همرقص مرد به رقاصه داده میشود. در این لحظه بالاتنه رقاصه خم شده است؛ چرخش بکندی آغاز میشود و سپس رقاصه با حرکتی ظریف و تند بدن خودرا راست میکند، یعنی تمام نقاط بدنش را به محور چرخش نزدیک میسازد. ثبات گشتاور چرخنده موجب افزایش شدید سرعت می‌شود.

کیفیت برداری گشتاور چرخنده

تا کنون سخن بر سر کمیت گشتاور چرخنده بود. اما گشتاور چرخنده واجد خواص کمیت برداری است.

چرخش نقطه‌ای را گرد «مرکز» دلخواه مورد بررسی قرار میدهیم. در شکل ۶۲ دو موقعیت نزدیک بهم نقطه نشان داده شده‌اند. حرکت مورد بحث ما با کمیت گشتاور چرخنده و صفحه چرخش مشخص میگردد. صفحه چرخش در تصویر هاشور زده شده است — قسمت.



شکل ۶۲

های هاشور زده نمایشگر سطحی است که بوسیله شعاع واصل از «مرکز» به نقطه متحرک پیموده میشود. میتوان مبین های جهت صفحه حرکت و کمیت گشتاور ضربه را یکی کرد. برای این کار از بردار گشتاوری که در امتداد عمود بر صفحه حرکت قرار دارد و از لحاظ کمی با قدر مطلق گشتاور مساوی است استفاده میکنیم. اما کار بدینجا پایان نمی‌یابد. باید جهت حرکت در صفحه را نیز بحساب آورد، چون جسم می‌تواند در جوار مرکز در جهت حرکت عقربه و یا در خلاف آن بچرخد.

معمولاً بردار گشتاور ضربه اینطور کشیده میشود که اگر از سمت مقابل بردار نگاه کنیم، دوران نقطه در جهت عکس چرخش عقربه ساعت صورت گیرد. یا بعبارت دیگر رابطه جهت بردار گشتاور ضربه با جهت چرخش مثل جهت حرکت میله بطری بازکن پیچی با جهت چرخش دسته آنست.

بدینسان اگر بردار گشتاور ضربه معلوم باشد قضاوت در باره کمیت گشتاور، وضع صفحه حرکت در فضا و جهت چرخش نسبت به «مرکز» نیز امکانپذیر خواهد شد.

در صورتیکه حرکت در صفحه واحدی انجام گیرد ولی بازو و سرعت هر بار متغیر باشد، سوی بردار گشتاور ضربه در فضا محفوظ خواهد ماند ولی طول آن تغییر خواهد کرد.

ممکن است چنین بنظر رسد که فقط بمنظور صرفه‌جوئی در کلمات است که ما جهت صفحه حرکت و کمیت گشتاور چرخنده را در مفهوم واحدی جمع میکنیم. اما چنین نیست. آنگاه که ما با سیستم اجسام متحرک در صفحات مختلف سر و کار داریم، تنها با جمع گشتاورهای چرخنده بعنوان بردار است که ما میتوانیم قانون بقای گشتاور را بدست آوریم.

این نکته نشان میدهد که اسناد خصلت برداری به گشتاور چرخنده دارای مضمون ژرفی است. گشتاور چرخنده همیشه نسبت به یک «مرکز» اختیاری که بطور شرطی انتخاب شده است معین میگردد و طبعاً مقدار آن بطور کلی بسته به گزینش این نقطه است. اما می‌توان نشان داد که اگر سیستم مورد بحث در مجموع ساکن باشد (مقدار حرکت کل آن صفر باشد)، گزینش «مرکز» تاثیری بر بردار گشتاور

چرخنده ندارد. این گشتاور چرخنده را می‌توان گشتاور چرخنده درونی سیستم اجسام نامید.
قانون بقای بردار گشتاور مقدار حرکت سومین و آخرین قانون بقاء در مکانیک است. ولی صحبت ما از سه قانون بقاء کاملاً دقیق نیست، حون مقدار حرکت و گشتاور آن کمیت‌های برداری هستند و قانون بقای کمیت برداری بمعنای آنست که نه فقط قدر عددی کمیت، بلکه سوی آن نیز ثابت و بدون تغییر میماند، یا بسخن دیگر، هر سه سازنده بردار بر روی سه محور مختصات در فضا بی‌تغییر میمانند. انرژی کمیتی است عددی، مقدار حرکت کمیتی برداری است، گشتاور چرخنده نیز کمیت برداری است. بنا بر این دقیق‌تر خواهد بود اگر بگوئیم که در مکانیک هفت قانون بقاء موجود است.

فرفره‌ها

آزمایش کنید که ته بشقابی‌را بر نوک تعلیمی نازکی قرار دهید و آنرا در حالت موازنه نگاه دارید. قطعاً از عهده این کار برنخواهید آمد. اما ژونگلورهای چینی این شعبده را که مورد علاقه آنها است، در آن واحد با چند تعلیمی انجام میدهند. ضمناً ژونگلور اصراری هم ندارد که چوبها را در حالت قائم نگاه دارد. واقعاً تماشاچیان دچار حیرت میشوند وقتی می‌بینند که بشقابها با اتکای بسیار مختصر به نوک تیز چوبدستیهای باریکی که تا حد افقی خم شده‌اند، ابدا نمیافتند و تقریباً در هوا معلقند.
اگر موقعی امکان یافتید کار ژونگلورها را از نزدیک مشاهده کنید به یک نکته بسیار مهم توجه داشته باشید: ژونگلور بشقابها را طوری به چرخش درمیاورد که آنها بسرعت در صفحه خود بچرخند.
ژونگلور ضمن شعبده‌بازی با وسائل دیگری مانند میل حلقه و کلاه نیز همیشه سعی میکند آنها را بچرخش درآورد. تنها در این صورت است که اشیاء در حالت اولیه خود بدست وی باز میگردند.
چرا چرخش موجب استواری است؟ علت را باید در قانون بقای گشتاور جستجو کرد. با تغییر سمت محور چرخش جهت بردار گشتاور چرخنده نیز تغییر میکند.

گرایش جسمی را که تند میچرخد به حفظ جهت محور چرخش خود در موارد کثیری میتوان مشاهده نمود. مثلاً فرفره چرخنده حتی در صورت کج شدن محورش نیز واژگون نمیشود.

امتحان کنید با دست فرفره چرخانی را واژگون سازید، خواهید دید که کار باین سادگیها هم نیست.

در توپخانه از ثبات جسم چرخنده استفاده میشود. لابد شنیده‌اید که جدار داخلی لوله توپ را پیچدار (خاندار) میسازند. گلوله ضمن پرواز در مسیر خود بدور محورش میچرخد، و همین امر سبب میشود که در هوا «معلق» نزند. توپ خاندار در مقایسه با توپهای بی‌خان از دقت و برد تیراندازی بیشتری برخوردار است. برای خلبانان و دریانوردان همیشه لازمست بدانند که خط قائم زمینی نسبت به موقعیت هواپیما یا کشتی در لحظه مفروض چگونه قرار دارد.

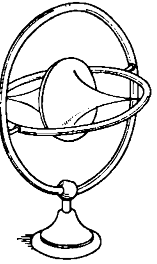
از آنجا که تغییر جهت سرعت مستلزم نیرو است، تغییر جهت چرخش نیز مستلزم گشتاور نیرو میباشد، و مقدار این گشتاور، هر اندازه جسم سریعتر بچرخد، بیشتر است. شاقول بدرد این کار نمیخورد، زیرا در جریان حرکت شتابدار از حالت قائم منحرف میشود. بدینمنظور از فرفره‌های تند چرخ که دارای ساختمان مخصوصی هستند و بنام گردش‌نما (ژیروسکوپ) مشهورند استفاده میشود. اگر محور چرخش ژیروسکوپ‌را روی خط قائم زمین قرار دهیم، هواپیما هر وضعی هم که در فضا بخود بگیرد، محور ژیروسکوپ همان امتداد قائم خودرا حفظ خواهد کرد.

مطلب در اینجاست که فرفره روی چه قرار دارد؟ اگر روی پایه‌ای که با هواپیما تغییر جهت میدهد قرار داشته باشد، در اینصورت محور چرخش چگونه قادر بحفظ جهت خود خواهد بود؟

در اینجا استفاده از دستگاه تعلیق کاردان (تصویر ۶۳) مسئله را حل میکند. در این دستگاه بعلت وجود حداقل اصطکاک در نقاط اتکاء، فرفره در وضعی قرار میگیرد که گوئی در هوا آویزان است.

بیاری فرفره‌های چرخنده میتوان مسیر اژدر یا هواپیمارا در جهت تعیین شده بطور خودکار تثبیت کرد. این کار بکمک مکانیسم‌هائی انجام می‌پذیرد که «مراقب» انحراف جهت محور اژدر از محور فرفره هستند.

ساختمان دستگاه مهمی چون قطب‌نمای ژیروسکوپی نیز بر اساس استفاده از فرفره چرخنده استوار است. می‌توان ثابت کرد که تحت تاثیر نیروهای کریولیس و اصطکاک بالاخره محور فرفره بموازات محور زمین قرار میگیرد، یعنی سمت شمال را نشان میدهد.



شکل ۶۳

از قطب‌نمای ژیروسکوپی بطور وسیعی در ناوگانها استفاده میشود. قسمت اصلی این قطب‌نما را موتوری با چرخ طیار سنگین و تعداد دور تا ۲۵۰۰۰ در دقیقه تشکیل میدهد.

علیرغم برخی مشکلات موجود در زمینه مرتفع ساختن موانع از قبیل تکان کشتی، قطب‌نماهای ژیروسکوپی بر انواع مغناطیسی آن برتری دارند. نارسائی قطب‌نماهای مغناطیسی در تحریف سنجش‌ها زیر تاثیر اشیاء آهنی و دستگاههای الکتریکی موجود در کشتی می‌باشد.

محور انحناپذیر

محورهای توربین‌های بخاری معاصر از اجزاء مهم این ماشین‌های غول پیکر محسوب میشوند. تهیه محورهائی که طولشان به ۱۰ متر و مقطعشان به ۰٫۵ متر میرسد مسئله تکنولوژی مشکلی است. محور توربین پرتوان قادر به تحمل باری حدود ۲۰۰ تن است و با سرعتی معادل ۳۰۰۰ دور در دقیقه میچرخد.

بدواً شاید بنظر رسد که چنین محوری باید فوق‌العاده محکم باشد. اما در واقع چنین نیست. با سرعت دهها هزار دور در دقیقه محوریکه محکم به دستگاه نصب شده و فاقد قابلیت انحناء است، هر قدر هم محکم باشد، ضمن چرخش حتما خواهد شکست.

درک این که چرا محورهای سخت غیر قابل استفاده‌اند مشکل نیست. هر قدر هم که ماشین سازان دقت بخرج دهند باز هم قادر

نخواهند بود از ناقرینگی چرخ توربین — ولو بمقدار خیلی کم — بپرهیزند.
در عین دوران چرخ توربین نیروهای گریز از مرکز عظیمی ایجاد میگردند. یاد آور میشویم که میزان آن متناسب است با مجذور سرعت چرخش. اگر این نیروها دقیقاً متعادل نباشند، محور توربین شروع به «برخورد شدید» با یاتاقانها کرده (چون نیروهای گریز از مرکز غیر متعادل همراه توربین «دوران» میکنند)، آنها را میشکنند و توربین را داغان می‌نماید.

در گذشته این پدیده مشکلاتی برطرف ناشدنی در راه افزایش سرعت چرخش توربین‌ها ایجاد میکرد، تا اینکه در مرز سده‌های گذشته و کنونی راه حل این مشکل پیدا شد: در تکنیک توربین‌سازی محورهای قابل انحناء مورد استفاده قرار گرفت.

برای فهم فکر این اختراع برجسته محاسبه تاثیر مجموع نیروهای گریز از مرکز ضروری است. چطور باید این نیروها را باهم جمع کنیم؟ معلوم میشود که نقطه اثر برایند تمام نیروهای گریز از مرکز در مرکز ثقل محور است و کمیت آن برابر حالتی است که تمام جرم چرخ توربین در مرکز ثقل آن متمرکز شده باشد.

فاصله مرکز ثقل چرخ توربین از محور را که بعلت وجود ناقرینگی مختصر چرخ با صفر تفاوت دارد، با حرف a نشان میدهیم. محور در حین چرخش تحت تاثیر نیروهای گریز از مرکز قرار خواهد گرفت و انحناء خواهد یافت. تغییر مکان محور را بوسیله l نشان میدهیم و بمحاسبه آن می‌پردازیم. فرمول نیروی گریز از مرکز بر ما معلوم است (به صفحه ۶۹ مراجعه کنید) این نیرو متناسب است با فاصله مرکز ثقل تا محور که حالا $a+l$ می‌باشد و مساوی است با $4\pi^2n^2(Ma+l)$. در اینجا n تعداد دور در دقیقه و M جرم قطعات چرخنده است. نیروی گریز از مرکز بوسیله نیروی کشسانی که متناسب باندازه تغییر مکان محور می‌باشد متعادل میشود و مساوی kl است. در اینجا ضریب k تعیین‌کننده درجه سختی و استحکام محور است. پس:

$$kl = 4\pi^2n^2M(a+l)$$

خواهد بود.

از رابطه فوق نتیجه میشود که

$$l = a \frac{1}{\frac{k}{4\pi^2 n^2 M} - 1}$$

است.

بر طبق این فرمول برای محور انحناءپذیر کثرت تعداد دورها خطرناک نیست. اگر تعداد دورها — n — خیلی زیاد (حتی بی نهایت زیاد) شود، بر میزان انحناء محور l بطور نامحدود افزایش نخواهد یافت. کمیت $\frac{k}{4\pi^2 n^2 M}$ در آخرین فرمول به صفر میگراید و انحناء محور l مساوی مقدار ناقرینگی a میشود، منتها با علامت مخالف.

نتیجه این محاسبه حاکی از اینست که چرخ نامتقارن در موقع چرخش با تعداد ادوار زیاد، بجای تلاشی محور، بدان چنان انحنائی می‌بخشد که تاثیر ناقرینگی خنثی میشود. محور انحناپذیر تمرکز اجزاء چرخنده را منظم میکند و با انحناء خود مرکز ثقل را به محور چرخش منتقل می‌نماید و بدین ترتیب تاثیر نیروی گریز از مرکز را به صفر مبدل میسازد.

انحناءپذیری محور نه تنها نقص آن نیست، بلکه برعکس شرط لازم ثبات و استواری آنست. زیرا محور برای ثبات خود باید بدون شکسته شدن باندازه a انحناء یابد.

خواننده دقیق می‌تواند در مباحثات ما متوجه خطائی شود. اگر محوری را که ضمن دورانهای بسیار سریع «مرکزیت» یافته، از موقعیت موازنه‌ای که بدست آمده خارج کنیم و فقط نیروهای گریز از مرکز و کشسان را در نظر بگیریم، بآسانی متوجه میشویم که این موازنه پایدار نیست. اما معلوم میشود که نیروهای کریولیس داخل عمل میشوند و این موازنه را کاملاً پایدار میسازند.

توربین باهستگی شروع بچرخش میکند. بدواً، وقتیکه n بسیار کم است، کسر $\frac{k}{4\pi^2 n^2 M}$ دارای کمیت بزرگی خواهد بود. تا زمانیکه ضمن افزایش تعداد دور مقدار این کسر بیشتر از یک باشد، کمیت انحناء محور دارای همان علامت تغییر مکان اولیه مرکز ثقل چرخ

خواهد بود. بدین ترتیب، در این لحظات اولیه حرکت، محور ضمن انحناپذیری، سرکزیت چرخ راتاسین نمیکند، بلکه برعکس، با انحنا خود تغییر مکان کلی مرکز ثقل و بالنتیجه نیروی گریز از مرکز را افزون میسازد. همزمان با افزایش تعداد دورها n (منتها ضمن شرط $\left(\frac{k}{4\pi^2 n^2 M} > 1\right)$ تغییر مکان افزایش خواهد یافت و بالاخره لحظه بحرانی فرا میرسد. هنگامیکه $\frac{k}{4\pi^2 n^2 M} = 1$ شد، مخرج فرمول تغییر مکان l به صفر میگراید، یعنی انحنا محور بصورت ظاهر بی‌نهایت بزرگ میشود. در چنین سرعتی محور میشکند. موقع براه انداختن توربین باید از این لحظه سریعاً رد شد، بایستی از حالت کمیت بحرانی تعداد ادوار جهید و با افزایش شدید سرعت چرخش توربین، آنرا به حدی رساند که از آنجا پدیده تنظیم خود بخودی سرکزیت چرخ، پدیده‌ای که شرط آن در بالا داده شد، آغاز میگردد.

اما این لحظه چگونه مشخص میشود؟ شرط فرا رسیدن این لحظه را میتوان با رابطه زیر نشان داد:

$$4\pi^2 \frac{M}{k} = \frac{1}{n^2}$$

و یا اینکه با تعویض تعداد دورها با دوره چرخش از طریق رابطه $n = \frac{1}{T}$ و جذر گرفتن به این شکل نشان داد:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{k}}$$

کمیت سمت راست تساوی بالا عبارت از چیست؟ فرمول کاملاً آشنا بنظر میرسد. با مراجعه به صفحه ۱۲۶ ملاحظه میکنیم که کمیت سمت راست فرمول بالا نمایشگر دوره خاص نوسان چرخ نصب شده بر روی محور است. دوره $2\pi\sqrt{\frac{M}{k}}$ دوره نوسان چرخ توربینی با جرم M و واقع بر روی محوری با سختی k است، بشرط اینکه چرخ را از محل خود کنار بکشیم تا بخودی خود بنوسان درآید.

پس لحظه خطرناک، زمان انطباق دوره چرخش چرخ توربین با دوره خاص نوسان سیستم توربین — محور می‌باشد. ایجاد تعداد بحرانی ادوار معلول پدیده رزونانس است.

کشش

زمین روی چه استوار است؟

در ازمنهٔ قدیم به این سئوال پاسخ بسیار ساده‌ای میدادند و میگفتند: روی سه نهنگ یا روی شاخ گاو. درست است که معلوم نبود آن نهنگها یا آن گاو خودشان روی چه چیزی قرار داشتند، ولی نیاکان ساده ما را این مسئله ناراحت نمیساخت.

تصورات صحیح در باره کیفیت حرکت زمین و شکل آن و همچنین در باره بسیاری از قانونمندیهای حرکت سیارات بدور خورشید مدتها قبل از اینکه به سئوال مربوط به علل حرکت سیارات پاسخ داده شود پدید آمده بودند.

واقعاً ببینیم زمین و سیارات دیگر روی چه «قرار گرفته‌اند»؟ چرا آنها در مسیرهائی معینی بدور خورشید میگردند و از آن منحرف و پرت نمیشوند؟

دیر زمانی پاسخ بدین سئوالات وجود نداشت و کلیسا که علیه سیستم کپرنیک در مورد عالم مبارزه میکرد از این موضوع برای نفی واقعیت حرکت زمین استفاده می‌نمود.

کشف حقیقت را ما مرهون دانشمند بزرگ انگلیسی ایساآک نیوتن (۱۶۴۳ — ۱۷۲۷) هستیم.

روایت مشهور تاریخی حاکی از آنست که نیوتن، در حالیکه در باغی زیر درخت‌سیب نشسته بود و به نظاره سیب‌هائی که یکی پس از دیگری در اثر وزش باد بزمین میافتادند مشغول بود، به فکر وجود نیروی جاذبه بین تمام اجسام عالم افتاد.

در نتیجه کشف نیوتن معلوم شد که بسیاری پدیده‌های طبیعت

که بظاهر ناهمگون مینمایند نظیر سقوط اجسام آزاد به زمین، حرکات قابل رویت ماه و خورشید، جزر ومد اقیانوسها و غیره مظاهر یک قانون واحد طبیعت قانون جاذبه عمومی می‌باشند.

این قانون گویای آنست که بین تمام اجسام عالم از ذرات شن دانه‌های نخود و سنگها و صخره‌ها گرفته تا سیارات نیروهای جاذبه متقابل دست اندر کار تاثیرند.

در اولین برخورد این قانون نادرست بنظر میآید. چونکه ما هیچوقت ندیده‌ایم که اشیاء دوروبر ما یکدیگر را جذب کنند. در اینکه زمین هر جسمی را بسوی خود میکشد شکی نیست. ولی ممکنست این خاصیت ویژه زمین باشد؟

نه اینطور نیست. نیروی جاذبه بین اشیاء و اجسام گوناگون دوروبر ما زیاد نیست و تنها بدین سبب است که بچشم نمیخورد. مع‌الوصف آن‌را بوسیله آزمایشهای مخصوص میتوان آشکار ساخت. ولی در این باره بعداً بحث خواهیم کرد.

ثبات منظومه شمسی، حرکت سیارات و دیگر اجرام سماوی را تنها قانون جاذبه عمومی می‌تواند توضیح دهد.

ماه در مدار خود بوسیله نیروی جاذبه زمین نگاه داشته میشود و زمین در اثر نیروی جاذبه خورشید در مسیر خود استوار است.

حرکت دورانی اجرام سماوی همانند حرکت دورانی سنگی است که بریسمانی بسته‌شده و همراه آن میچرخد.

نیرو های جاذبه عمومی «طنابهای» نامرئی اند که اجرام سماوی را بحرکت در مسیرهای معینی وامیدارد.

صرفاً تایید وجود نیروهای جاذبه عمومی کافی نبود. نیوتن قانون جاذبه را کشف نمود و نشان داد که این نیروها بچه عواملی وابسته‌اند.

قانون جاذبه عمومی

اولین پرسشی که نیوتن در مقابل خود قرار داد این بود که فرق بین شتاب کرهٔ ماه و شتاب سیب چیست؟ بعبارت دیگر چه تفاوتی است بین شتاب g که بوسیله کره زمین در سطح آن، یعنی در فاصله r از مرکز زمین ایجاد میشود و شتابی که توسط زمین

در فاصله R که مساوی مسافت کرهٔ ماه تا زمین است بوجود میآید؟

برای محاسبه این شتاب v^2/R لازم بود که سرعت حرکت ماه و فاصله آن از زمین معلوم باشند. نیوتن از هر دو این ارقام اطلاع داشت. در نتیجه، شتاب ماه $0{,}27$ cm/sec² بدست آمد که تقریباً ۳۶۰۰ بار از $g=980$ cm/sec² کوچکتر است.

پس شتابی که زمین ایجاد میکند با دوری از مرکز آن کاسته میشود. اما با چه سرعتی؟ فاصله بین زمین و ماه ۶۰ بار از شعاع کره زمین بیشتر است، رقم ۳۶۰۰ نیز مجذور ۶۰ است. پس مشاهده میشود که با ۶۰ بار افزایش مسافت شتاب باندازه $(60)^2$ کاهش یافت.

نیوتن بدین نتیجه رسید که شتاب و بنابر این نیروی جاذبه به نسبت معکوس مجذور مسافت تغییر میکند. بعلاوه ما میدانیم که نیروی موٴثر بر جسم در میدان جاذبه متناسب با جرم آن می‌باشد. لذا یک جسم جسم دیگر را با نیروئی متناسب با جرم جسم دومی به خود جذب میکند و برعکس، جسم دومی جسم اولی را با نیروئی متناسب با جرم جسم اولی جذب مینماید.

در اینجا صحبت بر سر نیروهای همسان یعنی نیروهای کنش و واکنش است. لذا نیروی جاذبه متقابل باید متناسب با اجرام هر دو جسم جاذب و مجذوب و یا بعبارت دیگر متناسب با حاصلضرب اجرام آنها باشد.

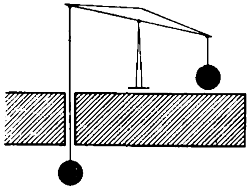
بدین ترتیب

$$F=\gamma\frac{Mm}{r^2}$$

این همان قانون جاذبه عمومی است که برحسب نظریه نیوتن برای هر زوج جسم صادق است.

اکنون دیگر این فرضیه تهورآمیز کاملاً باثبات رسیده است. بدینسان نیروی جاذبه دو جسم با حاصلضرب اجرام آنها نسبت مستقیم و با مجذور فاصله بین آنها نسبت معکوس دارد.

حال ببینیم که در فرمول بالا γ عبارت از چیست؟ ضریب تناسب است. آیا میشود، چنانکه ما بارها عمل کرده‌ایم، آنرا برابر عدد یک انگاشت؟ نه، اینکار ممکن نیست. ما شرط کردیم جرم را با گرم مسافت را با سانتیمتر و نیرو را با دین اندازه بگیریم. مقدار γ مساوی نیروی



شکل ٦٤

جاذبه‌ایست که بین دو جسم یک گرمی و واقع در فاصله یک سانتیمتری از یکدیگر بوجود میآید. ما نمی‌توانیم نیرورا مساوی چیزی و از جمله یک دین بگیریم: ضریب γ باید اندازه‌گیری شود.

برای یافتن γ حتماً احتیاج به اندازه‌گیری نیروهای جاذبه وزنه‌های یک گرمی حتمی نیست. برای ما مناسبتر است که اندازه‌گیری روی اجسام وزین صورت گیرد، تا نیرو بیشتر باشد.

اگر اجرام و فاصله بین دو جسم معلوم باشند و نیروی جاذبه اندازه‌گیری شود، γ با یک محاسبه ساده پیدا میشود.

اینگونه آزمایشها بکرات انجام گشته و نشان داده‌اند که صرفنظر از جنس اجسام جذب شونده و خواص محیط آنها، γ همیشه مقداری ثابت و مساوی $٦,٦٧ \times ١٠^{-٨}\ cm^{٣}/g\ sec^{٢}$ می‌باشد.

در شکل ٦٤ شمای یکی از آزمایشهای مخصوص اندازه‌گیری γ نشان داده شده است. بدو انتهای شاهین ترازوئی دو گلوله هم‌جرم آویخته شده‌اند. یکی از گلوله‌ها بالای یک صفحه سربی و دیگری پائین آن قرار گرفته است. بدیهیست که سرب (برای آزمایش صد تن سرب گرفته شده) با جاذبه خود بر وزن گلوله فوقانی افزوده و از وزن گلوله پائینی میکاهد. در نتیجه جرم گلوله فوقانی برپائینی میچربد. از روی اندازه انحراف شاهین ترازو مقدار γ اندازه گرفته میشود.

دشواری پیدا کردن نیروی جاذبه بین دو جسم در ناچیز بودن کمیت دو بار سنگین هزار کیلوگرمی اگر مثلاً در فاصله یکمتری از هم قرار گرفته باشند، با نیروی ناچیزی که فقط ٦,٧ دین یعنی ٠,٠٠٧ گرم است بسوی یکدیگر کشیده میشوند.

اما نیروهای جاذبه بین اجرام سماوی بسیار بزرگند! بین کرات ماه و زمین نیروی جاذبه

$$F=۶,۷\times ۱۰^{-۸}\,\frac{۶\times ۱۰^{۲۷}\times ۰,۷۴\times ۱۰^{۲۶}}{(۳۸\times ۱۰^{۹})^{۲}}=$$
$$=۲\times ۱۰^{۲۵}\ \mathrm{din}\approx ۲\times ۱۰^{۱۹}\ \mathrm{kgf}$$

می‌باشد.

و بین زمین و خورشید

$$F=۶,۷\times ۱۰^{-۸}\,\frac{۲\times ۱۰^{۳۳}\times ۶\times ۱۰^{۲۷}}{(۱۵\times ۱۰^{۱۲})^{۲}}=$$
$$=۳,۶\times ۱۰^{۲۷}\ \mathrm{din}\approx ۳,۶\times ۱۰^{۲۱}\ \mathrm{kgf}$$

است.

توزین کره زمین

قبل از اینکه به استفاده از قانون جاذبه عمومی بپردازیم، لازم است توجه خود را به نکته مهمی معطوف داریم.

همین حالا ما نیروی جاذبه بین دو بار را که در فاصله یک متری از یکدیگر قرار گرفته بودند، حساب کردیم. حال اگر این اجسام در فاصله یک سانتیمتری از هم قرار داشته باشند محاسبه چگونه انجام میشود؟ آیا باید فاصله بین سطوح خارجی اجسام را گرفت، یا فاصله بین مراکز ثقل آنها و یا اینکه چیز دیگری‌را؟

قانون جاذبه عمومی $F=\gamma\frac{m_{۱}m_{۲}}{r^{۲}}$ را تنها وقتی دقیقا می‌توان بکار برد که چنین تردیدهائی وجود نداشته باشند. فاصله بین اجسام باید خیلی بیشتر از ابعاد آنها باشد تا ما حق داشته باشیم اجسام‌را مانند نقطه‌هائی در نظر بگیریم. در مورد اجسامی که نزدیک یکدیگر قرار دارند، شیوه عمل اصولاً آسان است: باید ذهناً اجسام‌را به قطعات کوچکی تقسیم نمود و برای هر زوج قطعات نیروی F را حساب کرد و سپس این نیروها را (بصورت برداری) باهم جمع کرد.

این کار البته در اصل آسان، ولی در عمل بسیار مشکل می‌باشد.

اما طبیعت در این مورد به ما کمک کرده است. محاسبه نشان میدهد که اگر اجزاء جسم متقابلاً با نیروئی متناسب با $\frac{1}{r^2}$ بر یکدیگر تاثیر میکنند، پس اجسام کروی دارای این خاصیتند که مثل نقاط واقع در مراکزشان همدیگر را جذب میکنند.و در مورد دو گوی نزدیک بهم فرمول $F=\gamma\frac{m_1m_2}{r^2}$ اگر r فاصله بین مراکز گویها باشد با همان دقتی که در مورد اجسام دور از هم دارا میباشد صدق میکند. ما قبلاً این قاعده را برای محاسبه شتاب در سطح زمین بکار برده‌ایم.

حالا ما محقیم فرمول جاذبه‌را برای محاسبه نیروی جذب جسمی توسط کره زمین بکار بردیم.

فرض کنیم M جرم و R شعاع کره زمین باشد. در اینصورت نیروی جاذبه جسم دارای جرم m در سطح زمین:

$$F=\gamma\frac{M}{R^2}m$$

خواهد بود.

ضمنا این نیرو همان وزن جسم است که ما همیشه آنرا بصورت mg بیان میداریم. پس شتاب نیروی ثقل

$$g=\gamma\frac{M}{R^2}$$

می‌باشد.

حالا دیگر ما می‌توانیم بگوئیم که چطور زمین‌را وزن کردند. γ، g و R مقادیر معلومی هستند و با گذاشتن آنها در رابطه بالا جرم زمین را می‌توان بدست آورد. بهمین شکل خورشید را نیز می‌توان وزن کرد.

ولی آیا می‌شود چنین محاسبه‌ای را توزین نامید؟ البته که میشود. اندازه‌گیریهای غیر مستقیم در فیزیک نقش کمتری از اندازه‌گیریهای مستقیم ایفا نمیکنند.

حال بحل مسئله‌جالبی میپردازیم.

در طرحهای مربوط به ایجاد شبکه جهانی تلویزیون ماهواره «آویزان»، یعنی ماهواره‌ای که پیوسته در یک نقطه معین از صفحه استوا بر فراز سطح زمین قرار داشته باشد، نقش اساسی برعهده دارد. آیا چنین ماهواره‌ی متحمل اصطکاک خواهد شد؟ این بسته به آنست که ماهواره تا چه حد دور از زمین چرخش خودرا انجام میدهد.

ماهواره «آویزان» باید با دوره T برابر ۲۴ ساعت دوران کند، اگر r فاصله ماهواره از مرکز زمین باشد سرعت حرکت ماهواره $v=\frac{2\pi r}{T}$ و شتاب آن $\frac{v^2}{r}=\frac{4\pi^2}{T^2}r$ خواهد بود. از سوی دیگر این شتاب که منشأ آن جاذبه زمین است مساوی $\gamma\frac{M}{r^2}=g\frac{R^2}{r^2}$ می‌باشد.

با تساوی مقادیر شتاب نتیجه زیر را بدست میآوریم:

$$g\frac{R^2}{r^2}=\frac{4\pi^2 r}{T^2}$$

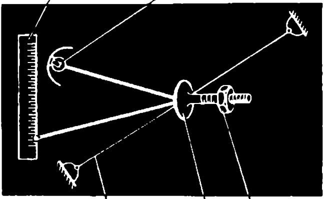
یعنی

$$r^3=\frac{gR^2T^2}{4\pi^2}$$

با گذاشتن مقادیر سرراست $g=10\ \mathrm{m/sec^2}$ ، $R=6\times10^6\ \mathrm{m}$ و $T=9\times10^4\ \mathrm{sec}$ در فرمول‌های بالا نتیجه میشود که $r^3=7\times10^{22}$ یعنی $r\approx4\times10^7\ \mathrm{m}=40000\ \mathrm{km}$. در چنین ارتفاعی اصطکاک با آتمفسر وجود ندارد و ماهواره «آویزان» اگر بسود آنرا ساخت «دو بیحرکت» خودرا کند نخواهد ساخت.

سنجش‌های g در خدمت اکتشافات

در اینجا صحبت بر سر اکتشافات نظامی نیست. دانستن شتاب نیروی ثقل بدرد اکتشافات نظامی نمیخورد. منظور اکتشافات زمین-



شکل ٦٥

شناسی است که هدفشان تجسس و یافتن لایه‌های معدنی است، بدون کندن زمین، بدون حفر نقبهای زیرزمینی.

برای تعیین بسیار دقیق شتاب نیروی ثقل چند شیوه موجود است. می‌توان g را بسهولت از طریق توزین وزنه استاندارت با ترازوهای فنری اندازه‌گیری کرد. ترازوهای ژئولوژیکی بایستی تا سرحد امکان حساس باشند. کشش فنر آنها با اضافه کردن باری بوزن کمتر از یک میلیونیم گرم تغییر میکند. ترازوی پیچشی کوارتزی نتایج بسیار عالی نشان میدهند. ساختمان آن اصولا بغرنج نیست. به نخ کوارتزی که بطور افقی کشیده شده اهرمی لحیم شده است که در نتیجه وزن آن، نخ اندکی پیچ میخورد. (تصویر ٦٥).

آونگ نیز به همین منظور بکار برده میشود، تا همین چندی پیش شیوه‌های آونگی یگانه وسیله سنجش g بودند و تنها در ده بیست سال اخیر شیوه‌های توزین که مناسبتر و دارای دقت بیشتراند، بتدریج شروع به ازمیدان بدر کردن شیوه‌های آونگی نمودند. بهر حال، با اندازه‌گیری دوره نوسان آونگ، از روی فرمول $T = ۲\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ می‌توان مقدار g را با دقت کافی پیدا کرد.

با اندازه‌گیری مقدار g در نقاط مختلف بوسیله یک دستگاه سنجش معین می‌توان در باره تغییرات نسبی نیروی ثقل با دقتی تا یک میلیونیم قضاوت نمود.

یک پژوهنده ضمن اندازه‌گیری g در نقطه‌ای از سطح زمین متوجه اختلالی میشود و ملاحظه میکند که اندازه بدست آمده از میزانی که باید باشد مقداری کمتر و یا بیشتر است.

این میزان g چه اندازه است؟

مقدار شتاب نیروی ثقل در سطح زمین دستخوش دو تغییر قانونمند میشود که مدتهاست مورد پژوهش قرار گرفته و بر پژوهندگان بخوبی معلوم است.

قبل از هر چیز با حرکت از قطب به استوا g بصورت قانونمندی کاهش می‌یابد. در باره این مطلب در بالا گفته شد. در اینجا ما تنها یادآور میشویم که این دگرگونی بدو علت صورت میگیرد: اولاً، زمین کره نیست و اجسام واقع در قطب بمرکز زمین نزدیکترند؛ ثانیاً با نزدیک شدن به استوا نیروی ثقل هر چه بیشتر بوسیله نیروی گریز از مرکز تضعیف میشود.

دومین تغییر قانونمند g عبارتست از کاهش آن همراه با افزایش ارتفاع. هر قدر از مرکز زمین دورتر شویم g بر طبق فرمول $g=\gamma\frac{M}{(R+h)^2}$ کمتر میشود.

در اینجا R شعاع زمین و h ارتفاع نسبت به سطح دریاست.

بدینسان در عرض‌های جغرافیائی واحد و ارتفاعات یکسان از سطح دریا شتاب نیروی ثقل باید یکسان باشد.

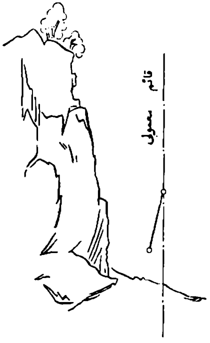
اندازه‌گیریهای دقیق نشان میدهند که غالباً انحرافاتی از این میزان بچشم میخورند که اختلالات جاذبه نامیده میشوند. علت وجود این اختلالات ناهمگونی پخش جرم در نزدیکی محل اندازه‌گیری است.

چنانکه توضیح دادیم، نیروی جاذبه وارد از جانب یک جسم بزرگ را می‌توان ذهناً بعنوان مجموع نیروهای وارد از جانب اجزاء جداگانه آن تصور نمود. جذب آونگ بوسیله زمین نتیجه تاثیر تمام اجزاء زمین برآنست. اما بدیهی است که اجزاء نزدیکتر در جمع نیروها دارای سهم بیشتراند — چون جاذبه با مجذور فاصله نسبت معکوس دارد.

اگر در نزدیکی محل اندازه‌گیری اجرام سنگین متمرکز شده باشند، g از میزانش بیشتر و در حالت عکس کمتر از آن خواهد بود.

مثلاً اگر g را در ارتفاع یکسانی روی کوه و در هواپیمای در

حال پرواز روی دریا اندازه بگیریم، در حالت اول رقم بیشتری بدست میآید. مثلاً روی کوه اتنه در ایتالیا کمیت g باندازه $0{,}292\ cm/sec^2$ بیشتر از میزان آنست. در جزایر تک‌افتاده در اقیانوسها نیز مقدار g از میزان معینش بیشتر است. واضح است که در هر دو حالت علت افزایش g را باید در تمرکز اجرام اضافی در محل اندازه‌گیری دانست.



شکل ٦٦

نه فقط مقدار g بلکه جهت نیروی ثقل نیز ممکن است از میزان معین آن منحرف شود. اگر وزنه‌ای را به نخی بیاویزیم، نخ کشیده شده قائم محل‌را نشان میدهد. این قائم ممکن است از میزان منحرف باشد. جهت «عادی» قائم‌را زمین‌شناسان از روی نقشه‌های مخصوصی که در آنها از روی اطلاعات مربوط به مقادیر g شکل «ایده‌آل» زمین ساخته شده است، پیدا میکنند.

تصور کنید که در دامنه کوهی بلند با یک شاغول دست به آزمایشی زده‌اید. وزنه شاغول از طرف زمین بسوی مرکز آن و از جانب کوه به کنار جذب میشود. در این شرائط شاغول باید از سمت قائم عادی منحرف شود (شکل ٦٦). از آنجا که جرم زمین خیلی بیشتر از جرم کوه است اینگونه انحرافها از چند ثانیه زاویه‌ای تجاوز نمیکنند.

قائم «عادی» از روی ستارگان تعیین میشود، چونکه برای هر نقطه جغرافیائی محاسبه شده است که در لحظه معین شبانه‌روز و سال، قائم شکل «ایده‌آل» زمین بکدام نقطه آسمان برمیخورد.

انحرافهای شاغول‌گاه نتایج عجیبی بدست میدهد. مثلاً، در فلورانس تاثیر کوههای آپنین بجای جذب شاغول آنرا دفع میکنند. این پدیده را تنها با یک دلیل میتوان توضیح داد و آن اینست که در کوهها محافظ تهی عظیمی وجود دارند.

اندازه‌گیری شتاب نیروی ثقل در مقیاس قاره‌ها و اقیانوسها نتایج عالی بدست میدهد. قاره‌ها از اقیانوسها بمراتب سنگین‌ترانده، از اینرو قاعدتاً مقدار g بر فراز قاره‌ها باید بیشتر از فراز اقیانوسها باشد. اما در واقع مقادیر g که در طول یک عرض جغرافیائی اندازه‌گیری شده باشد چه در بالای قاره‌ها و چه برفراز اقیانوس‌ها بطور متوسط یکسان است.

این امر نیز فقط یک علت دارد و آن اینست که قاره‌ها بر روی اقشار سبکتری نسبت به اقیانوسها قرار دارند. در واقع هم آنجا که کاوش های مستقیم امکان‌پذیر است زمین‌شناسان ثابت کرده‌اند که اقیانوسها بر روی سنگهای سنگین بازالتی و خشکی‌ها برروی سنگهای خارای سبک قرار گرفته‌اند.

اما فوراً سئوال زیر پیش میآید: چطور شده است که این اقشار سنگین و سبک با چنین دقتی تفاوت بین اوزان قاره‌ها و اقیانوسهارا جبران می‌کنند؟ چنین حالتی نمی‌تواند تصادفی باشد. علل آن را باید در ساختار غشاء کره زمین جستجو کرد.

زمین‌شناسان چنین می‌پندارند که بخش‌های فوقانی پوسته زمین مثل اینکه برروی فرشی از یک جرم پلاستیکی (یعنی ماده‌ای که مثل خاک رس مرطوب بسادگی تغییر شکل میدهد) شناورند. فشار در ژرفای حدود ۱۰۰ کیلومتری در همه جا باید یکسان باشد، همانطور که فشار در ته ظرف آبی که در آن قطعات چوب با اوزان متفاوت شناورند بیک اندازه است. روی این اصل، هر ستونی از ماده به مساحت یک متر مربع، از سطح زمین تا ژرفای ۱۰۰ کیلومتری، چه در زیر خشکی و چه در زیر اقیانوس بایستی دارای وزن معین و واحدی باشد.

این هم‌تراز شدن فشارها (آنرا ایزوستاز نامیده‌اند) است که باعث میشود بر فراز خشکی‌ها و اقیانوسها در طول یک خط عرض جغرافیائی مقادیر شتاب نیروی ثقل g دارای تفاوت قابل ملاحظه ای نمیباشند.

اختلالات موضعی نیروی ثقل برای ما همان نقش چوبدست سحرآمیز موک کوچک از قصه گاوت را بازی میکند که هر جا طلا و نقره‌ای در دل خاک پنهان بود همانجا بر زمین میخورد.

سنگهای معدنی سنگین را باید در جاهائی که g حداکثر است

جستجو نمود. برعکس نهشت‌های سبک نمکی را باید در محلهائی که مقدار g نازل است پیدا کرد. سنجش g با دقتی تا یک صدهزارم cm/sec^2 امکان‌پذیر است.

شیوه‌های کاوش بکمک آونگ و ترازوهای فوق حساس را شیوه‌های ثقلی یا گرانشی می‌نامند. این شیوه‌ها بویژه برای کاوش‌های نفتی دارای اهمیت عملی زیادی هستند، بکمک کاوش بشیوه‌های گرانشی بسادگی میتوان طاقهای زیرزمینی نمک را پیدا کرد و اغلب مشاهده میشود که در جائی که نمک است نفت هم وجود دارد. ضمناً نفت در ژرفا قرار دارد و نمک نزدیک سطح زمین.

در کازاخستان و برخی جاهای دیگر کشف نفت بشیوه کاوش گرانشی انجام گرفته است.

نیروی ثقل در زیر زمین

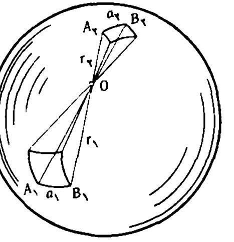
یک مسئله جالب دیگر باقی مانده است که باید روشن شود و آن اینستکه با فرو رفتن بعمق زمین نیروی ثقل چگونه تغییر میکند.

وزن هر شیئی نتیجه کشش تارهای نامرئی است که از اجزاء زمین به آن شیئی کشیده شده است. وزن نیروئی برایند است و مرکب از کلیه نیروهائی می‌باشد که اجزاء کره زمین بر شیئی وارد می‌آورند. این نیروها، برغم اختلاف جهات تاثیرشان، جسم را به «پائین» یعنی بسوی مرکز زمین میکشند.

حال به‌بینیم ثقل شیئی واقع در آزمایشگاه زیرزمینی از چه قرار است؟ در این حالت شیئی تحت تاثیر نیروهای جاذبه اقشار درونی و برونی زمین قرار میگیرد.

نیروهای جاذبه قشر برونی‌را بر نقطه واقع در درون کره زمین مورد بررسی قرار میدهیم. اگر این قشر را به لایه‌های نازکی تقسیم کنیم و در یکی از آنها مربع کوچکی با ضلع a_1 را در نظر بگیریم و خطوطی از پیرامون مربع به نقطه O که ثقل در آن مورد توجه ماست وصل نمائیم، در محل دیگری از قشر، مربعی دارای اندازه دیگر با ضلع a_2 بدست میآید (شکل ۶۷). نیروهای جاذبه وارد بر نقطه O

از سوی دو مربع کوچک متوجه جهات متقابل بوده و بر طبق قانون جاذبه متناسبند با m_1/r_1^2 و m_2/r_2^2. جرم مربعها m_1 و m_2 با مساحت آنها تناسب دارد. بنابراین نیروهای جاذبه متناسبند با a_1^2/r_1^2 و a_2^2/r_2^2.



شکل ۶۷

اما این دو نسبت با یکدیگر مساویند. از شکل ۶۷ پیداست که a_1/r_1 و a_2/r_2 عبارتند از نسبت اضلاع مربوطه مثلثهای OA_1B_1 و OA_2B_2 که در صورت بسیار کوچک بودن اضلاع مربعهای A_1B_1 و A_2B_2، باهم متشابهند. انتخاب اندازه این دو ضلع در اختیار ماست.

در واقع اگر مربعها کوچک باشند، جهات پاره‌خطهای A_1B_1 و A_2B_2 با جهات خطوط مماس بر این نقاط فرق مختصری خواهند داشت. در اینصورت می‌توان زاویه B_1A_1O و زاویه متمم A_2B_2O را مانند زوایای متشکله بین مماس و وتر و متکی بر قوس واحد مساوی شمرد. نتیجتاً $\angle B_1A_1O = \angle OA_2B_2$ می‌باشد. بعلاوه زوایای رأسی نیز با یکدیگر برابرند پس مثلثها باهم متشابه در میایند.

از این برهان هندسی بدین نتیجه میرسیم که $\frac{a_1}{r_1} = \frac{a_2}{r_2}$ بوده و لذا نیروهای جاذبه وارده از سوی دو مربع کوچک بر نقطه O یکدیگر را متعادل میسازند.

با تقسیم لایه نازک به چند زوج مربع «متقابل» به واقعیت درخور توجهی برخوردیم: قشر نازک و همگون کره‌ای بر نقطه واقع در درون خود تاثیری نمیکند. اما این در مورد همه لایه‌های نازکی که ما کمربند کره‌ای واقع در بالای نقطه زیرزمینی مورد نظرمان را به آنها تقسیم کرده‌ایم، صحت دارد.

این بدانمعنی است که قشر زمین واقع در بالای جسم انگار که وجود خارجی ندارد، چون تاثیر بخش‌های مجزای آن بوسیله یکدیگر

خنثی میشوند و نیروی برایند جاذبه از سوی قشر برونی برابر صفر میگردد.

البته در کلیه این مباحثات ما چگالی کره زمین‌را درون هر قشر ثابت انگاشتیم.

در نتیجه این مباحثات ما می‌توانیم بسادگی فرمول تعیین کننده نیروی ثقل در هر ژرفای H در زیرزمین را بدست بیاوریم. نقطه واقع در ژرفای H تنها جاذبه اقشار درونی زمین‌را تحمل میکند. فرمول شتاب نیروی ثقل $g=\gamma\frac{M}{R^{2}}$ برای این مورد هم قابل استفاده است، اما M و R جرم و شعاع تمام کره زمین نبوده و تنها متعلق به بخشی از آنست که نسبت به نقطه مورد نظر جنبه «درونی» دارد.

اگر زمین در تمام اقشارش چگالی یکسانی داشت، فرمول g بشکل زیر درمیآمد:

$$g=\gamma\frac{\varrho\frac{4}{3}\pi(R_{\text{زمین}}-H)^{3}}{(R_{\text{زمین}}-H)^{2}}=\frac{4}{3}\pi\gamma\varrho(R_{\text{زمین}}-H)$$

در اینجا ϱ چگالی و $R_{\text{زمین}}$ شعاع کره زمین است.

این بدانمعنی است که g با $(R_{\text{زمین}}-H)$ نسبت مستقیم دارد: هر چه H بیشتر باشد g کمتر خواهد بود.

و اما در نزدیکی سطح زمین (ما تا عمق ۵ کیلومتر پائین‌تر از سطح دریا قادر به بررسی آن هستیم) تغییرات g ابداً تابع این قانون نیست. تجربه نشان میدهد که در این اقشار، برعکس، با افزایش ژرفا g رو بتزاید میگذارد. اختلاف بین تجربه و فرمول بدست‌آمده را باید نتیجه بحساب نیاوردن تفاوت چگالی در عمق‌های مختلف دانست.

چگالی متوسط زمین را میتوان از تقسیم جرم کره زمین بر حجم آن محاسبه کرد. در نتیجه این محاسبه عدد ۵٫۵۲ بدست میاید. ضمناً چگالی اقشار سطحی زمین خیلی کمتر است و برابر ۲٫۷۵ میباشد. چگالی اقشار زمین با افزایش ژرفا زیاد میشود. در اقشار نزدیک به سطح زمین این اثر بر کاهش ایده‌الی که از فرمول بدست‌آمده منتج میگردد میچربد و مآلاً بر مقدار g افزوده میشود.

ما تا بحال از روی یک مثال ساده با انرژی جاذبه آشنائی پیدا کرده‌ایم. جسمی که به ارتفاع h بر فراز زمین بالا برده شده است، واجد انرژی پتانسیل mgh می‌باشد.

اما از این فرمول تنها موقعی میتوان استفاده کرد که ارتفاع h در مقایسه با شعاع زمین بسیار کم باشد.

انرژی جاذبه کمیتی است مهم و یافتن فرمول آن جالب است — البته فرمولی که برای اجسام، به هر ارتفاعی از سطح زمین که بالا برده شوند و نیز عموماً برای دو جرمی که یکدیگر را بر طبق قانون عمومی

$$F=\gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

جذب میکنند بکار آید.

فرض کنیم که دو جسم تحت تاثیر کشش متقابل اندکی بیکدیگر نزدیک شده‌اند و فاصله بین آنها کمی کوتاه شده از r_1 به r_2 رسیده است. در این جریان، کاری برابر $A=F(r_1-r_2)$ انجام می‌پذیرد. مقدار نیرو را باید در یکی از نقاط وسط گرفت. بدین ترتیب

$$A=\gamma \frac{m_1 m_2}{r^2_{\text{متوسط}}}(r_1-r_2)$$

اگر r_1 و r_2 با یکدیگر تفاوت کمی داشته باشند می‌شود بجای $r^2_{\text{متوسط}}$ حاصلضرب $r_1 r_2$ را گذاشت. در اینصورت رابطه زیر بدست میآید:

$$A=\gamma \frac{m_1 m_2}{r_2}-\gamma \frac{m_1 m_2}{r_1}$$

این کار بحساب انرژی جاذبه انجام گرفته است:

$$A=U_1-U_2$$

در اینجا U_1 کمیت اولیه و U_2 مقدار نهائی انرژی پتانسیل جاذبه است.

با مقایسه این دو فرمول رابطه زیر را برای انرژی پتانسیل جاذبه می‌یابیم:

$$U = -\gamma\frac{m_1 m_2}{r}$$

این رابطه شبیه فرمول نیروی جاذبه است با این تفاوت که r مخرج دارای توان یکم است.

برحسب این فرمول اگر r بسیار زیاد باشد انرژی پتانسیل U مساوی صفر بیشود و این کاملاً منطقی است، چون در چنین فواصلی جاذبه احساس نخواهد شد. اما با نزدیک شدن اجسام، انرژی پتانسیل باید کاهش یابد، چون کار حاصله بحساب این انرژی انجام میگیرد.

ولی از صفر دیگر بکجا کاهش می‌یابد؟ واضحست، بسمت منفی و بهمین علت جلو فرمول علامت منفی گذاشته شده است. معلوم است که ۵ — از صفر کوچکتر و ۱۰ — از ۵ — کمتر است.

اگر صحبت بر سر حرکت در جوارسطح زمین باشد، رابطه عمومی نیروی جاذبه را می‌توان با حاصلضرب mg تعویض نمود. آنگاه با دقت زیادی میتوانیم بنویسیم: $U_1 - U_2 = mgh$.

اما در سطح زمین جسم دارای انرژی پتانسیلی مساوی $-\gamma\frac{Mm}{R}$ است که در آن R شعاع زمین است. پس در ارتفاع h برفراز سطح زمین

$$U = -\gamma\frac{Mm}{R} + mgh$$

خواهد بود.

وقتی که ما برای اولین بار فرمول انرژی پتانسیل $U = mgh$ را یافتیم شرطمان بر این شد که ارتفاع و انرژی را از سطح زمین حساب کنیم. با استفاده از فرمول $U = mgh$ ما عضو ثابت $-\gamma\frac{Mm}{R}$ را حذف میکنیم، یعنی بطور مشروط آنرا مساوی صفر میگیریم. از آنجا که منظور ما اختلاف انرژی است (چون معمولاً کار که اختلاف انرژی

است اندازه گرفته میشود)، حضور عضو ثابت $\gamma\frac{Mm}{R}-$ در فرمول انرژی پتانسیل نقشی ایفا نمیکند.

انرژی جاذبه تعیین‌کننده استحکام زنجیرهای «پیوند» جسم به زمین است. چطور میشود این زنجیرها را پاره کرد تا جسمی که از زمین پرتاب شده است، دیگر بسوی آن باز نگردد؟ واضح است که برای این کار باید به جسم سرعت اولیه زیادی داد. ببینیم حداقل سرعت لازم برای این کار چیست؟

انرژی پتانسیل جسم پرتاب شده از زمین (گلوله، موشک) با دور شدن از زمین افزایش می‌یابد (قدر U کاهش می‌یابد) و انرژی سینتیک تقلیل پیدا می‌کند. اگر انرژی سینتیک جسم زودتر از موعد، یعنی قبل از اینکه ما زنجیرهای جاذبه کره زمین را پاره کنیم بصفر گراید، جسم پرتاب شده دوباره به زمین خواهد افتاد.

جسم باید انرژی سینتیک خودرا تا وقتی که انرژی پتانسیل آن عملاً به سرحد صفر نرسیده است، حفظ کند. انرژی پتانسیل گلوله قبل از پرتاب مساوی $\gamma\frac{Mm}{R}-$ می‌باشد (M و R جرم و شعاع زمین است). بنابر این به گلوله باید چنان سرعتی داد که انرژی کامل آنرا در لحظه جدا شدن از حیطه تاثیر جاذبه، مثبت سازد. جسم دارای انرژی کامل منفی (قدر مطلق انرژی پتانسیل از انرژی سینتیک بیشتر است) از حیطه میدان جاذبه خارج نخواهد شد.

بدینسان ما بشرط ساده‌ای میرسیم: برای اینکه جسم دارای جرم m از زمین کنده شود لازم است، چنانکه گفته شد، انرژی پتانسیل جاذبه $\gamma\frac{Mm}{R}$ را مرتفع ساخت.

سرعت گلوله در این مورد بایستی بمیزانی که دومین سرعت کیهانی $v_۲$ اصطلاح شده است و بسادگی از تساوی انرژیهای سینتیک و پتانسیل محاسبه میشود رسانده شود.

$$\frac{mv_۲^۲}{۲}=\gamma\frac{mM}{R}$$

یعنی

$$v_۲^۲=۲\gamma\frac{M}{R}$$

و چون $g=\gamma \frac{M}{R^2}$

$$v_2^2 = 2gR$$

مقدار v_2 که از این فرمول بدست میآید ۱۱ km/sec است — البته بدون در نظر گرفتن مقاومت اتمسفر. این سرعت باندازه $\sqrt{2}=1{,}41$ بار بیشتر از نخستین سرعت کیهانی $v_1=\sqrt{gR}$ ماهواره در حال چرخش در فضای مجاور زمین است، یعنی $v_2=\sqrt{2}\times v_1$.

جرم ماه ۸۱ بار کمتر از جرم زمین و شعاع آن چهار بار از شعاع زمین کمتر است. از اینرو انرژی جاذبه در ماه بیست بار کمتر از زمین میباشد و برای خروج از جاذبه ماه سرعت ۲,۵ km/sec بسنده است.

انرژی سینتیک $mv_2^2/2$ صرف پاره کردن زنجیرهای جاذبه سیاره یعنی ایستگاه مبدأ میشود. اگر بخواهیم که موشک پس از رفع نیروی جاذبه با سرعت v حرکت کند، این امر مستلزم صرف انرژی اضافی $mv^2/2$ میباشد. در این حالت، در حین فرستادن موشک بایستی بدان انرژی معادل $\frac{mv_\cdot^2}{2}=\frac{mv_2^2}{2}+\frac{mv^2}{2}$ را رساند. بدینسان سه سرعتی که از آنها سخن میرود بوسیله این رابطه ساده بهم وابستهاند:

$$v_\cdot^2 = v_2^2 + v^2$$

پس سرعت v_3 لازم برای خروج از میدان جاذبه زمین و خورشید، یعنی حداقل سرعت دستگاه پرندهای که بسوی ستارگان دوردست فرستاده میشود برابر چه رقمی باید باشد؟ علت نشان دادن این سرعت بوسیله v_3 در آنست که آنرا سومین سرعت کیهانی میخوانند.

ابتدا اندازه سرعتی را که فقط برای برطرف ساختن جاذبه خورشید لازمست معین میکنیم.

کمی پیش از این دیدیم که سرعت لازم خروج دستگاه پرنده از حیطه جاذبه زمین $\sqrt{2}$ بار بیشتر از سرعت ماهواره زمین بهنگام ورود آن به مدار است. این قضاوت در مورد خورشید نیز صادق است یعنی سرعت لازم برای خروج از حیطه جاذبه خورشید $\sqrt{2}$ بار بیشتر از سرعت ماهواره خورشید (یعنی زمین) میباشد. از آنجا که سرعت

حرکت زمین بدور خورشید تقریباً ۴۰ km/sec است، سرعت لازم برای فرار از حیطه جاذبه خورشید ۴۲ کیلومتر در ثانیه خواهد بود و این سرعت خیلی زیاد است، اما برای فرستادن دستگاه پرنده به ستارگان دوردست، بدیهیست که باید از حرکت کره زمین استفاده شود و جسم به طرفی پرتاب شود که زمین حرکت میکند. آنگاه فقط لازم است ۱۲=۳۰−۴۲ کیلومتر در ثانیه بسرعت آن افزود.

اکنون ما میتوانیم سومین سرعت کیهانی را کاملاً محاسبه کنیم. این سرعتی است که موشک را باید با آن پرتاب کرد تا ضمن خروج از حیطه جاذبه زمین دارای سرعت ۱۲ کیلومتر در ثانیه باشد. با استفاده از فرمولی که در بالا آورده شد تساوی زیر را بدست میآوریم

$$v_{۳}^{۲}=(۱۱)^{۲}+(۱۲)^{۲}$$

از اینجا نتیجه میشود که $v_{۳}=$۱۶ km/sec است.

بدین ترتیب با دارا بودن سرعتی معادل ۱۱ km/sec جسم زمین را ترک میکند، ولی چنین دستگاه پرنده‌ای زیاد «دور» نمیشود؛ زمین آنرا رها میکند ولی خورشید بدان آزادی نمیدهد. در این حالت جسم به ماهواره مصنوعی خورشید تبدیل میشود.

بطوریکه مشاهده میشود سرعت لازم برای مسافرت بین ستارگان فقط یک بار و نیم بیشتر از سرعت لازم برای مسافرت در منظومه شمسی داخل مدار زمین است. اما در حقیقت بطوریکه گفته شد هر گونه افزایش چشمگیر سرعت اولیه دستگاه پرنده با دشواریهای فنی زیادی همراه است (به صفحه ۹۶ مراجعه کنید).

سیارات چگونه حرکت میکنند

به سئوال چگونه سیارات حرکت میکنند، میتوان خیلی کوتاه پاسخ داد: با پیروی از قانون جاذبه، چون نیروهای جاذبه تنها نیروهای موثر بر سیاراتند.

از آنجا که اجرام سیارات بمراتب کمتر از جرم خورشید است، نیروهای تاثیر متقابل بین سیارات نقش مهمی ندارند. هر سیاره تقریباً بفرمان نیروی جاذبه خورشید حرکت میکند، گوئی سیارات دیگر وجود ندارند.

قوانین حرکت سیارات بدور خورشید از قانون جاذبه عمومی ناشی میگردند. ولی جریان امر از لحاظ تاریخی اینطور نبود. قوانین حرکت سیارات بوسیله ستاره‌شناس برجسته آلمانی یوهان کپلر قبل از نیوتن و بدون کمک قانون جاذبه، بر اساس تحلیل و جمع‌بندی مشاهدات نجومی که طی مدت تقریباً بیست سال گردآورده شده بود کشف شدند.

مسیرها و یا به اصطلاح ستاره‌شناسان مدارهائی که سیارات در گرد خورشید ترسیم میکنند خیلی به دایره نزدیکند.

بین دوره گردش سیاره و شعاع مدار آن چه رابطه‌ای وجود دارد؟

نیروی جاذبه‌ای که از جانب خورشید بر سیاره وارد میآید برابر است با

$$F=\gamma\frac{mM}{r^{2}}$$

در این فرمول M جرم خورشید، m — جرم سیاره و r فاصله بین آنهاست.

اما مطابق قانون اساسی مکانیک F/m چیزی بجز شتاب مرکز کش نیست:

$$\frac{F}{m}=\frac{v^{2}}{r}$$

سرعت سیاره را می‌توان بصورت کسری که صورت آن طول پیرامون دایره $2\pi r$ و مخرج آن دوره گردش T باشد در نظر گرفت. با گذاشتن $v=\frac{2\pi r}{T}$ و مقدار نیروی F در فرمول شتاب بدین نتیجه میرسیم:

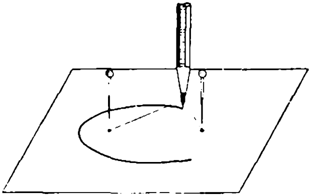
$$\frac{4\pi^{2}r}{T^{2}}=\frac{\gamma M}{r^{2}}$$

یعنی

$$T^{2}=\frac{4\pi^{2}}{\gamma M}r^{3}$$

ضریب تناسب جلو r^{3} کمیتی است تنها وابسته به جرم خورشید و یکسان برای همه سیارات. لذا برای دو سیاره رابطه زیر صحت دارد:

$$\frac{T_{1}^{2}}{T_{2}^{2}}=\frac{r_{1}^{3}}{r_{2}^{3}}$$



شکل ۶۸

نسبت مجذور زمانهای گردش سیارات با نسبت توان سوم شعاع های مدار آنها مساوی درمیآید. این قانون جالب‌را کپلر از روی تجربه پیدا کرده بود. بعداً قانون جاذبه عمومی مشاهدات کپلر را بشیوه علمی توضیح داد.

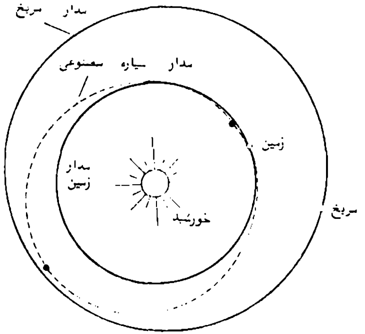
حرکت دورانی یک جسم ساوی گرد جسم دیگر تنها یکی از امکانات است.

مسیر حرکت یک جسم که تحت تاثیر نیروهای جاذبه گرد جسم دیگری بچرخش مشغول است می‌تواند دارای اشکال مختلف باشد. اما چنانکه محاسبه نشان میدهد، و حتی قبل از محاسبه هم بوسیله کپلر مشاهده شده بود، همه آنها متعلق بیک گروه منحنی‌ها که بیضی نامیده میشوند هستند.

اگر نخی را بدو سنجاق بسته و سنجاق‌ها را در کاغذ رسم فرو کنیم و با نوک تیز مداد نخ را کشیده و در همین حالت مداد را روی صفحه کاغذ طوری بحرکت درآوریم که نخ پیوسته در حالت کشش باشد، سر انجام منحنی مسدودی ترسیم خواهد شد که همان بیضی است (شکل ۶۸). نقاطی که سنجاقها در آنها فرو رفته‌اند کانونهای بیضی را تشکیل خواهند داد.

بیضی‌ها می‌توانند دارای اشکال مختلف باشند. اگر نخ را خیلی درازتر از فاصله بین سنجاقها بگیریم، بیضی حاصله خیلی شبیه دایره خواهد بود. برعکس، اگر درازی نخ خیلی کم بیشتر از فاصله بین سنجاقها باشد، بیضی درازی — ترسیم خواهد شد.

سیارات بیضی‌هائی ترسیم میکنند که در یکی از کانونهای آنها خورشید قرار دارد.



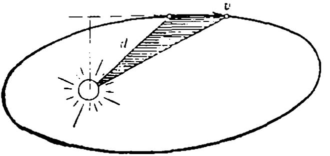
شکل ۶۹

بیضی‌های رسم‌شده بوسیله سیارات چه شکل‌اند؟ بطوریکه معلوم است خیلی نزدیک بدایره هستند.

مسیر مشتری که نزدیکترین سیاره به خورشید است حداکثر تفاوت با دایره را دارا میباشد. ولی در این مورد نیز تفاوت قطر بزرگتر با قطر کوچکتر فقط ۲ درصد است. در مورد سیاره‌های مصنوعی قضیه بگونه دیگر است. به شکل ۶۹ نگاه کنید. مدار مریخ را نمی‌توان از دایره تشخیص داد.

ولی خورشید در یکی از کانونهای بیضی قرار دارد نه در مرکز آن، و بدینجهت فاصله سیاره از خورشید بیشتر تغییر میکند. دو کانون بیضی‌را با خطی بهم وصل کنیم، این خط بیضی‌را در دو نقطه قطع خواهد کرد. نقطه تقاطع نزدیکتر بخورشید را حضیض و نقطه تقاطع دورتر را اوج سیاره می‌نامند. مشتری در حضیض یکبار و نیم نزدیکتر بخورشید قرار میگیرد تا در اوج خود.

مدارهای سیارات عمده بدور خورشید بشکل بیضی نزدیک به دایره اند، ولی اجرام سماوی هستند که در مسیرهائی بشکل بیضی خیلی کشیده گرد خورشید در حرکتند. ستارگن دنباله‌دار از این جمله‌اند. مدار آنها از لحاظ کشیدگی اصلاً با مدار سیارات قابل مقایسه نیست. میتوان گفت که اجسام سماوی دارای مدارهای بیضوی به خانواده



شکل ۷۰

خورشید تعلق دارد. ولی اجرام تصادفی نیز گاه و بیگاه سری به منظومه ما میزنند.

مثلاً ستارگان دنباله‌داری مشاهده شده‌اند با چنان مسیرهائی منحنی در نزدیک خورشید که از روی شکل آنها ما میتوانستیم به این نتیجه برسیم که: این ستاره دیگر باز نخواهد گشت و به خانواده منظومه شمسی تعلق ندارد. منحنی‌های «باز» ترسیم شده بوسیله ستارگان دنباله‌دار را هذلولی می‌خوانند.

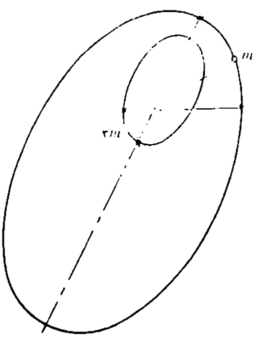
این ستارگان دنباله‌دار مخصوصاً هنگام گذار از نزدیک خورشید با سرعت بیشتری حرکت میکنند. این موضوعی است قابل فهم. انرژی کل ستاره دنباله‌دار کمیتی است ثابت. با نزدیکی بخورشید انرژی پتانسیل بحداقل میرسد، یعنی انرژی سنتیک حرکت در این صورت حداکثر خواهد بود. البته چنین تاثیری برای تمام سیارات و منجمله زمین ما وجود دارد، ولی مقدار آن بعلت کمی تفاوت انرژیهای پتانسیل در اوج و حضیض زیاد نیست.

قانون جالب حرکت سیارات از قانون بقای گشتاور مقدار حرکت ناشی میشود. درشکل ۷۰ دو موضع سیاره‌ای نمایش داده شده‌اند. از خورشید یعنی از کانون بیضی دو شعاع بدین مواضع کشیده و قطاع مشتکله هاشور زده شده است. حال لازم است اندازه مساحتی‌را که شعاع در واحد زمان می‌پیماید تعیین نمود. چون زاویه کوچک است قطاعی را که شعاع در مدت یک ثانیه ترسیم میکند می‌توان با مثلث تعویض نمود. قاعده مثلث‌را سرعت v تشکیل میدهد (راه پیموده شده در یک ثانیه) و ارتفاع آن مساوی بازوی سرعت d می‌باشد. لذا مساحت مثلث مساوی $vd/۲$ خواهد بود.

از قانون بقای گشتاور نتیجه میشود که کمیت mvd هنگام حرکت

مقداریست ثابت. اما اگر mvd ثابت باشد، مساحت مثلث $vd/۲$ نیز ثابت و بدون تغییر خواهد بود. ما می‌توانیم قطاعهای مربوط به لحظات مختلف زمانی را رسم کنیم و آنها از لحاظ مساحت یکسان خواهند بود.

سرعت سیاره تغییر میکند ولی آنچه که آنرا می‌توان سرعت قطاعی نامید بی‌تغییر باقی میماند.



شکل ۷۱

همه ستارگان از سیارات احاطه نشده‌اند. در آسمان ستارگان مزدوج خیلی زیادند، یعنی دو جسم عظیم سماوی بدور هم میچرخند.

جرم عظیم خورشید آنرا به مرکز منظومه تبدیل میکند. در ستارگان مزدوج هر دو جسم اجرامی از لحاظ کمیت نزدیک بهم دارند و در اینصورت نمی‌توان یکی از آنها را ساکن شمرد. پس در این صورت حرکت چگونه انجام میگیرد؟ ما میدانیم که هر سیستم مسدودی دارای یک نقطه ساکن (یا در حال حرکت یکنواخت) میباشد که همان مرکز اینرسی است و هر دو ستاره بدور آن میچرخند. در ضمن آنها بیضی‌های مشابهی ترسیم میکنند که از شرط $\frac{r_۲}{r_۱}=\frac{m_۱}{m_۲}$، که در صفحه ۱۵۴ شرح داده شد نتیجه میشود. بیضی یکی از ستارگان بتعداد مراتب افزایش جرم آن نسبت بدیگری از بیضی ستاره دیگر بزرگتر است (شکل ۷۱). در صورت تساوی اجرام، هر دو ستاره گرد مرکز اینرسی مسیرهای یکسانی‌را خواهند پیمود.

سیارات منظومه شمسی در شرائط ایده‌آل قرار دارند: آنها در معرض اصطکاک نیستند.

اجسام سماوی مصنوعی کوچک ساخته انسان ــ ماهواره‌ها در

چنین شرائط ایده‌آلی قرار ندارند. نیروهای اصطکاک، ولو ابتدا خیلی هم ناچیزند، اما بهر حال بطور محسوسی در حرکت آنها دخالت میکنند.

انرژی کل سیاره بی‌تغییر میماند، در صورتیکه انرژی کل ماهواره کمی کاهش می‌یابد. در نظر اول تصور میشود که اصطکاک باید موجب کندی حرکت ماهواره شود ولی در واقع عکس این اتفاق میافتد.

قبل از هر چیز بخاطر بیاوریم که سرعت ماهواره مساوی $\sqrt{gR}$ یا $\sqrt{\gamma\frac{M}{R}}$ است. در اینجا R فاصله تا مرکز زمین و M جرم زمین می‌باشد.

انرژی کل ماهواره مساویست با

$$F=-\gamma\frac{Mm}{R}+\frac{mv^{2}}{2}$$

با گذاشتن مقدار سرعت ماهواره در فرمول بدین نتیجه میرسیم که انرژی سینتیک برابر است با $\gamma\frac{mM}{2R}$. ما می‌بینیم که قدر مطلق انرژی سینتیک دو بار کمتر از انرژی پتانسیل است و انرژی کل برابر

$$E=-\gamma\frac{mM}{R}$$

می‌باشد.

در صورت وجود اصطکاک انرژی کل کاهش می‌یابد، یعنی (چون انرژی کل منفی است) بر قدر مطلق آن افزوده میشود. فاصله R شروع به کاهش میکند، یعنی ارتفاع ماهواره بتدریج کم میشود. در این حالت عناصر تشکیل دهند انرژی چه میشوند؟ انرژی پتانسیل کاهش می‌یابد (بر قدر مطلق آن افزوده میشود) و انرژی سینتیک افزایش پیدا میکند.

اصطکاک باعث بالا رفتن سرعت حرکت ماهواره میشود نه کند شدن آن.

از اینجا معلوم میشود که چرا موشک حامل بزرگ بر ماهواره کوچک سبقت میگیرد. چون موشک بزرگ با اصطکاک بیشتری رو برو میشود.

بحث ما در اینجا بر سر پی‌آمدهای غم‌انگیز فقدان ماه برای شعرا و عشاق نیست. عنوان این مبحث را باید در چهار چوب زندگی، در چگونگی تاثیر آن بر مکانیک زمینی، درک کرد.

هنگامیکه ما قبلاً نیروهای مؤثر بر کتابی را که روی میز قرار داشت مورد بحث قرار میدادیم، بطور مطمئنی فقط از جاذبه زمین و نیروی واکنش سخن میگفتیم. اما اگر بمسئله دقیق‌تر برخورد کنیم، کتاب واقع بر روی میز زیر تاثیر نیروهای جاذبه ماه و خورشید و حتی ستارگان نیز قرار دارد.

ماه نزدیکترین همسایه ماست. لحظه‌ای خورشید و ستارگان را بدست فراموشی بسپاریم و ببینیم که وزن اجسام روی زمین چقدر زیر تاثیر ماه تغییر میکند.

زمین و ماه بطور نسبی در حرکتند. کره زمین در مجموع (یعنی تمام نقاط آن) نسبت به ماه با شتاب $\gamma \frac{m}{r^2}$ حرکت میکند. در اینجا m جرم ماه و r فاصله بین مراکز زمین و ماه است.

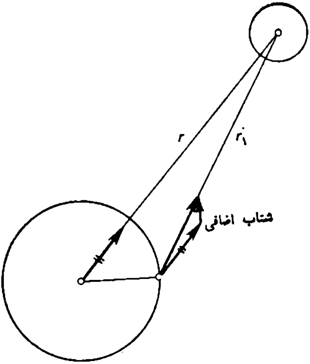
جسم واقع در سطح زمین‌را مورد بررسی قرار میدهیم. برای ما جالب است بدانیم که وزن این جسم زیر تاثیر ماه چقدر تغییر میکند. وزن جسم در روی زمین بوسیله شتاب نسبت به زمین تعیین میشود، بنا بر این ما بعبارت دیگر میخواهیم بدانیم که تحت تاثیر ماه تا چه حد شتاب جسم واقع در سطح زمین نسبت به کره زمین تغییر میکند.

شتاب زمین نسبت به ماه $\gamma \frac{m}{r^2}$ و شتاب جسم در سطح زمین نسبت بماه $\gamma \frac{m}{r_1^2}$ است. در اینجا r_1 فاصله جسم تا ماه است. (شکل ۷۲)

برای ما شتاب اضافی جسم نسبت بزمین ضروری است که مساوی تفاضل هندسی شتابهای مربوطه می‌باشد.

برای زمین مقدار $\gamma \frac{m}{r^2}$ رقمی است ثابت، ولی $\gamma \frac{m}{r_1^2}$ در نقاط مختلف سطح زمین متفاوت است. پس بنابراین تفاوت هندسی مورد نظر ما نیز در نقاط مختلف متفاوت کره زمین خواهد بود.

حال ببینیم که ثقل زمین‌در نزدیکترین و دورترین نقاط و در نقاط میان آنها نسبت به ماه در سطح زمین چگونه خواهد بود؟



شکل ۷۲

برای یافتن شتاب جسم نسبت بمرکز زمین در نتیجه‌تاثیر ماه، یعنی برای تصحیح شتاب زمینی g، باید از مقدار $\gamma \frac{m}{r_1^2}$ در نقاط معینه کره زمین (پیکانهای روشن در شکل ۷۲) کمیت ثابت $\gamma \frac{m}{r^2}$ را کم کرد. ضمناً باید بخاطرداشت که سوی شتاب $\gamma \frac{m}{r^2}$ زمین نسبت به ماه موازی خط وصل کننده مراکز کرات زمین و ماه است. کم کردن یک بردار همسنگ اضافه نمودن بردار معکوس آنست. در روی شکل بردار های $-\gamma \frac{m}{r^2}$ با پیکانهای تیره نشان داده شده‌اند.

با جمع کردن بردارهای کشیده شده در شکل، ما آنچه را که میخواهیم، یعنی تغییر شتاب سقوط آزاد سطح زمین در نتیجه تاثیر ماه را پیدا می‌کنیم.

در نزدیکترین نقطه به کره ماه برایند شتاب اضافی مساوی:

$$\gamma \frac{m}{(r-R)^2} - \gamma \frac{m}{r^2}$$

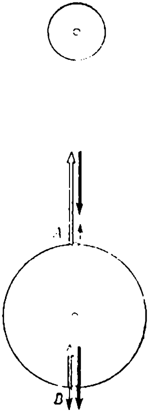
و متوجه بسوی ماه خواهد بود. در این حالت از ثقل زمین کاسته میشود و جسم در نقطه A سبکتر از حالتی که ماه وجود نداشته باشد می‌شود.

اگر در نظر بگیریم که R بمراتب کمتر از r است. فرمول بالا را میتوان ساده کرد. با گرفتن مخرج مشترک می‌توان نوشت:

$$\frac{\gamma mR\,(2r-R)}{r^2\,(r-R)^2}$$

اگر در پرانتزها از مقدار ناچیز R در مقابل مقادیر قابل ملاحظه r یا $2r$ صرفنظر کنیم نتیجه میشود:

$$\frac{2\gamma mR}{r^3}$$



شکل ۷۳

اکنون به نقطه مقابل می‌پردازیم. در نقطه B شتاب از جانب ماه کمتر از شتاب عمومی زمین است نه بیشتر از آن. اما ما حالا در آن طرف کره زمین که از کره ماه دورتر است قرار گرفته‌ایم. کاهش جاذبه ماه در این طرف کره زمین بهمان نتایجی منجر میشود که افزایش جاذبه در نقطه A ببار میآورد، یعنی به کاهش شتاب نیروی ثقل منجر میگردد. چه نتیجه غیر منتظره‌ای! — اینجا هم جسم تحت تاثیر ماه سبکتر شد. معلوم میشود که تفاضل

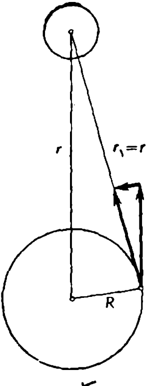
$$\gamma\frac{m}{(r+R)^2}-\gamma\frac{m}{r^2}\approx-\frac{2\gamma mR}{r^3}$$

دارای همان قدر مطلقی است که در نقطه A دارا میباشد.

در خط میانی وضع دیگری است. در اینجا سوی شتابها باهم تشکیل زاویه میدهند و تفاضل شتاب عمومی زمین بوسیله ماه و شتاب جسم واقع بر روی زمین بوسیله ماه، یعنی $\gamma\frac{m}{r^2}$ و $\gamma\frac{m}{r_1^2}$ را باید بشکل هندسی انجام داد (شکل ۷۴).

اگر جسم را روی زمین طوری قرار دهیم که r_1 و r از لحاظ کمیت برابر شوند باندازه ناچیزی از خط میانی دور میشویم. قاعده مثلث متساوی‌الساقین نمایشگر تفاضل برداری شتابهاست. از تشابه

مثلث‌های کشیده شده در شکل ۷۴، پیداست که شتاب مطلوب ما بتعداد مراتبی که R کوچکتر از r است کمتر از $\gamma \frac{m}{r^2}$ می‌باشد.



شکل ۷۴

پس مقداری که باید در خط میانی سطح زمین به g اضافه شود مساوی

$$\frac{\gamma m R}{r^3}$$

می‌باشد که رقمی است از لحاظ کمیت عددی دو بار کمتر از مقدار تضعیف نیروی جاذبه زمین در نقاط انتهائی. در باره سوی این شتاب اضافی باید بگوئیم که شتاب مزبور، چنانکه از روی شکل پیداست، در این مورد هم عملاً با قائم نقطه مفروض در سطح زمین تطابق حاصل میکند.

پس تاثیر کره ماه بر مکانیک زمین عبارتست از تغییر وزن اجسام واقع بر سطح زمین. ضمناً وزن جسم در نقاط دارای حداقل و حداکثر فاصله از ماه تقلیل می‌یابد و در خط میانی زیاد میشود و در اینجا تغییر وزن دو بار کمتر از نقاط قبلی است.

بدیهی است که بحث فوق‌الذکر در باره تمام سیارات، برای خورشید و برای همه ستارگان صادق است.

به آسانی میتوان از طریق محاسبه دانست که نه سیارات و نه ستارگان هیچکدام حتی جزء ناچیزی از شتاب کره ماه را نمیدهند.

مقایسه تاثیر هر جسم سماوی با تاثیر کره ماه خیلی آسان است: برای اینکار باید شتابهای اضافی این اجسام را بر «اضافه شتاب کره ماه» تقسیم نمود:

$$\frac{\gamma m R}{r^3} : \frac{\gamma m_{\text{ماه}} R}{r^3_{\text{ماه}}}$$

و یا

$$\frac{m}{m_{\text{ماه}}} \times \frac{r^3_{\text{ماه}}}{r^3}$$

این نسبت تنها در مورد خورشید اندکی کمتر از یک است. فاصله خورشید از ما بمراتب زیادتر از فاصله کره ماه از زمین است، ولی در عوض جرم ماه دهها ملیون بار کمتر از جرم خورشید میباشد.

با گذاشتن مقادیر مربوطه در نسبت بالا بدین نتیجه میرسیم که تاثیر خورشید بر ثقل زمین ۲٫۱۷ بار کمتر از تاثیر ماه است.

حال ببینیم اگر ماه مدار زمین را ترک کند وزن اجسام زمینی چقدر تغییر می‌یابد. با گذاشتن مقادیر عددی در عبارت $2\gamma mR/r^3$ معلوم میشود که شتاب ماه مقداری است معادل cm/sec^2 ۰٫۰۰۰۱ یعنی یک ده میلیونیم g.

بنظر خیلی ناچیز میرسد. آیا ارزش داشت که بخاطر چنین تاثیر ناچیزی، برای حل این مسئله نسبتاً مشکل مکانیک اینقدر تلاش شود؟ در نتیجه‌گیری عجله بخرج ندهید. این تاثیر «ناچیز» علت بوجود آمدن امواج پر قدرتی است که هنگام کشند پدیدار میشوند. این تاثیر در یک شبانه‌روز انرژی سینتیکی برابر 10^{16} کیلوگرم‌متر ایجاد میکند که مقادیر عظیم آب را جا بجا میسازد. این انرژی همسنگ انرژی تمام رودخانه‌های کره زمین است.

واقعاً هم درصد تغییرات کمی عوامل مورد محاسبه ما بسیار ناچیز است. جسمی که به این مقدار «ناچیز» سبک شده است، از مرکز زمین دور میشود. با در نظر گرفتن اینکه شعاع زمین ۶ میلیون متر است انحراف ناچیزی از آن به دهها سانتیمتر میرسد.

تصورش را بکنید که ماه حرکت خود را نسبت به کره زمین متوقف ساخته و در جائی برفراز اقیانوس میدرخشد. محاسبه نشان میدهد که سطح آب در اینجا باندازه ۵۴ سانتیمتر بالا میآید. بهمین اندازه‌نیز سطح آب در نقطه مقابل در آنسوی کره زمین بالا میآید. در خط میانگین بین این نقاط انتهائی سطح آب در اقیانوس ۲۷ سانتیمتر پائین خواهد رفت.

در نتیجه چرخش زمین بدور محور خود «محلهای» بالا و پائین رفتن آب در اقیانوسها پیوسته در تغییر میباشد. این همان پدیده جزر و مد است. در مدت تقریباً ۶ ساعت سطح آب بالا میآید و بسوی ساحل پیشروی میکند یعنی دریا در حال کشند یا مد است. سپس نوبت به جزر میرسد که آن هم ۶ ساعت طول میکشد. در هر شبانه‌روز

قمری دو مد و دو جزر بوقوع می‌پیوندد. منظره پدیده‌های جزر و مدی با در نظر گرفتن اصطکاک ذرات آب، شکل کف دریا و خطوط کرانه‌ها، بسیار پیحیده میشود.

مثلاً در دریای خزر وقوع جزر و مد امکان پذیر نیست، چون تمام سطح دریا همزمان در شرائط واحدی قرار میگیرد.

همینطور در دریاهای داخلی که بوسیله ترعه‌های باریک و دراز به اقیانوسها وصل میشوند مثلاً، دریاهای سیاه و بالتیک جزر و مد روی نمیدهد.

در خلیج‌های کوچک و تنگ بعلت سرازیر شدن امواج مدی از اقیانوس ارتفاع آب خیلی بالا میرود، مثلا در دهانه خلیج گیژی‌گینسک در دریای اختسک بلندی مد بچند متر میرسد.

اگر کرانه‌های اقیانوس خیلی هموار باشد (مثل کرانه‌های فرانسه)، آب دریا هنگام مد قادر است مرز خشکی و دریا را کیلومترها تغییر دهد.

پدیده‌های جزر و مد مخل گردش نمیشنند. چون حرکت امواج مدی با اصطکاک توام است. بر طرف ساختن این اصطکاک که اصطکاک مدی نامیده میشود مستلزم صرف کار است. از اینرو انرژی چرخش و همراه با آن سرعت چرخش زمین نزدیک محور کاهش مییابد.

این پدیده ضمناً به تطویل شبانه روز منجر میشود که در باره آن در صفحه ۱۲ سخن گفته شد.

اصطکاک مدی امکان فهم این مسئله را میدهد که چرا کره ماه همیشه با یک طرف خود متوجه زمین است.

زمانی کره ماه لابد به حالت مذاب بود. چرخش این کره مذاب گرد زمین همراه با اصطکاک بسیار شدید مدی بود که بتدریج حرکت ماه را کند میکرد، تا اینکه بالاخره ماه از چرخش بدور خود نسبت بزمین باز ایستاد. مدهای ماه متوقف شدند و نیمی از سطح آن برای همیشه از دیدگان ما مستور ماند.

فشار

پرس هیدرولیکی

پرس هیدرولیکی ماشینی است کهن، ولی اهمیت خودرا تا زمان ما حفظ کرده است.

به شکل ۷۵ بنگرید. در آن پرس هیدرولیکی مجسم شده است. در ظرف سربسته‌ای محتوی آب، دو پیستون متحرک — کوچک و بزرگ میتوانند حرکت کنند. اگر با دست به یکی از آنها فشار وارد آوریم، فشار به پیستون دیگر منتقل شده و در نتیجه این پیستون بالا میرود. هر اندازه که پیستون اول آب‌را بدرون ظرف میفشارد، بهمان اندازه آب زیر پیستون دوم بالا میآید.

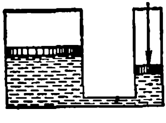
اگر سطح پیستون‌ها $S_۱$ و $S_۲$ و اندازه تغییر مکان آنها $l_۱$ و $l_۲$ باشد، از تساوی حجم آب تغییر مکان یافته نتیجه میشود:

$$S_۱l_۱=S_۲l_۲$$

و یا

$$\frac{l_۱}{l_۲}=\frac{S_۲}{S_۱}$$

برای ما لازم است که شرط موازنه پیستونها را بدانیم.



شکل ۷۵

این شرط را ما به آسانی از روی این اصل که کار نیروهای متعادل باید برابر با صفر باشد پیدا میکنیم. اگر این اصل صادق باشد، پس کارهائی که ضمن تغییر مکان پیستونها توسط نیروهای موثر بر آنها انجام گشته است، باید مساوی (با علائم مخالف) باشند. یعنی باید

$$F_1 l_1 = F_2 l_2$$

یا

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{l_1}{l_2}$$

باشد.

در مقایسه با تساوی قبلی مشاهده میشود که

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1}$$

این معادله ساده امکان افزایش فوق‌العاده نیرو را نشان میدهد. پیستون منتقل‌کننده فشار می‌تواند دارای سطحی صدها و هزاران بار کمتر از سطح پیستون دیگر باشد. نیروی موثر بر پیستون بزرگ بهمین نسبت از نیروی عضلانی وارد بر پیستون کوچک زیادتر خواهد بود.

بکمک پرس هیدرولیکی میتوان به کوفتن و پرسکاری فلزات پرداخت، انگور را فشرد و آب آن را گرفت و بارهای سنگین را بلند کرد.

البته برد در نیرو همراه با باخت در مسافت خواهد بود. برای اینکه جسمی را با پرس باندازه یک سانتیمتر بفشاریم، دست مجبور است راهی به تعداد مراتب تفاوت نیروهای F_1 و F_2 بیشتر طی کند.

نسبت نیرو به مساحت F/S را فیزیکدانان فشار می‌نامند. بجای اینکه بگوئیم نیروی یک کیلوگرمی بر مساحت یک سانتیمتر مربع وارد میآید، بطور خلاصه میگوئیم فشار p (فشار را با حرف p نشان میدهند) مساوی $1 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ است. حالا بجای رابطه $\frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1}$ می‌توان نوشت:

$$\frac{F_2}{S_2} = \frac{F_1}{S_1}$$

یعنی

$$p_1 = p_2$$

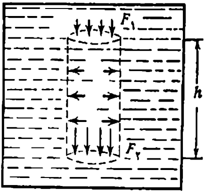
از اینجا معلوم میشود که فشار وارد بر هر دو پیستون یکی است.
این نتیجه‌گیری ما بهیچوجه به محل قرار گرفتن پیستونها و اینکه آیا سطوح آنها افقی است، قائم است و یا متمایل است ربطی ندارد. بطور کلی مسئله برسر پیستونها نیست. می‌توان ذهناً دو قسمت دلخواه از سطح مایع را گرفت و ملاحظه کرد که فشار روی این سطح در همه جا یکسان است.

بدین ترتیب معلوم میشود که فشار داخل مایع در تمام نقاط آن و در کلیه جهات یکسان است. بعبارت دیگر، بر سطحی به مساحت معین، صرفنظر از محل و چگونگی استقرار این سطح، نیروی یکسانی وارد میآید. این اصل قانون پاسکال نامیده میشود.

فشار هیدروستاتیک

قانون پاسکال برای مایعات و گازها صدق میکند. اما این قانون یک نکته مهم‌را بحساب نمی‌آورد و آن وجود وزن است.

در شرایط زمینی این عامل‌را نمیتوان بدست فراموشی سپرد. آب نیز دارای وزن است. بنا بر این کاملاً مفهوم است که بر دو سطح واقع در ژرفاهای متفاوت در زیر آب فشارهای مختلفی وارد خواهد آمد. این اختلاف فشار مساوی چیست؟ در درون مایع استوانه قائمی‌را که سطوح قواعد پائینی و بالائی آن افقی است، ذهنا جدا میکنیم. آب واقع در داخل آن به آب محیط بر استوانه فشار میآورد. نیروی کل این فشار مساوی وزن mg مایع درون استوانه است (شکل ۷۶). این نیروی کل مرکب است از نیروهائی که بر قاعده‌های استوانه و بر جدار پهلوئی آن وارد میآیند. اما نیروهای وارد بر جوانب متقابل جدار پهلوئی از لحاظ کمی برابر و دارای جهاتی معکوس یکدیگرند. بدین سبب حاصل جمع کلی نیروهای موثر بر جدار پهلوئی استوانه



شکل ۷۶

مساوی صفر است. لذا وزن mg برابر تفاضل نیروهای $F_2 - F_1$ میباشد. اگر ارتفاع استوانه h و سطح قاعده آن S و چگالی مایع ϱ باشد، بجای mg میتوان ϱghS نوشت. تفاضل نیروها مساوی این مقدار است. برای بدست آوردن اختلاف فشارها باید وزن را بر سطح S تقسیم نمود. اختلاف فشارها باین ترتیب برابر ϱgh میشود.

بر طبق قانون پاسکال فشار وارد بر سطوح دارای جهات مختلف ولی واقع در ژرفای یکسان بیک اندازه است. پس در دو نقطه مایع که یکی از آنها در ارتفاع h بالای دیگری قرار گرفته است، اختلاف فشارها مساوی وزن ستونی از مایع بارتفاع h و سطح مقطعی مساوی یک است:

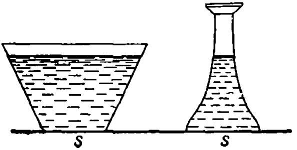
$$p_2 - p_1 = \varrho gh$$

فشار آب ناشی از سنگینی آنرا فشار هیدروستاتیکی مینامند.

در شرایط روی زمین سطح آزاد مایعات اغلب در معرض فشار هوا قرار دارد. فشار هوا را فشار جو یا آتمسفر می‌خوانند. فشار در زیر آب مرکب است از فشارهای آتمسفر و هیدروستاتیکی.

برای محاسبه نیروی فشار آب تنها دانستن اندازه سطحی که آب بر آن فشار وارد میآورد و ارتفاع ستون آب واقع در بالای این سطح لازم است. بقیه عوامل بموجب قانون پاسکال نقشی ندارند.

این امر ممکن است عجیب بنظر رسد. آیا واقعاً نیروی وارد بر قواعد یکسان دو ظرف (شکل ۷۷) بیک اندازه است؟ در ظرف دست چپی مقدار آب خیلی بیشتری است. ولی با وصف این، نیروهای موثر بر ته ظروف در هر دو حالت مساوی ϱghs می‌باشند. این مقدار از وزن آب ظرف سمت راستی بیشتر و از وزن آب ظرف سمت چپی کمتر است. در ظرف چپ جدارهای پهلوئی وزن آب «زیادی» را به



شکل ۷۷

خود میگیرند و در ظرف راست برعکس، نیروهای واکنش را به وزن آب اضافه میکنند.

این وضع جالب را گاه تناقض هیدروستاتیکی می‌نامند.

اگر دو ظرف مختلف‌الشکل‌را که ارتفاع سطح آب محتوی در آنها یکسان است با لوله‌ای بهم وصل کنیم، آب از ظرفی بظرف دیگر جریان نخواهد یافت. این جریان در صورت اختلاف فشار در این ظروف میتوانست صورت گیرد. ولی چنین اختلاف فشاری وجود ندارد و در ظروف مرتبطه صرفنظر از اشکال آنها مایعات دارای سطح یکسانی خواهند بود.

برعکس، در صورتیکه سطح آب در ظروف مرتبطه یکسان نباشد، جریان انتقال آب شروع میشود و سطوح یکسان خواهند گردید.

فشار آب بمراتب بیشتر از فشار هواست. در ژرفای ۱۰ متری آب بر یک سانتیمتر مربع با نیروئی مساوی kgf ۱ اضافه بر فشار آتمسفر فشار وارد میآورد و در ژرفای یک کیلومتری این رقم به $\frac{kgf}{cm^2}$ ۱۰۰ میرسد.

در برخی نقاط ژرفای اقیانوس تا ۱۰ کیلومتر میرسد. نیروی فشار آب در این اعماق فوق‌العاده زیاد است. قطعات چوبی که به ژرفای ۵ کیلومتری برده شوند، زیر تاثیر این فشار فوق‌العاده باندازه‌ای متراکم میگردند که پس از آن مثل آجر در بشکه آب غرق میشوند.

این فشار عظیم موانع زیادی در راه پژوهشگران زندگی موجودات زنده در دریاها ایجاد میکند. فرو رفتن به اعماق زیاد در بالن‌های پولادینی که باتیسفر یا باتیسکاف نام دارند و قادر به تحمل فشارهای بیش از یک تن بر سانتیمتر مربع می‌باشند انجام میگیرد.

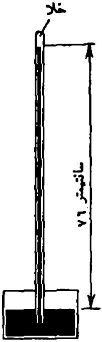
زیردریائی‌ها قادرند فقط تا عمق ۱۰۰ الی ۲۰۰ متر زیر آب فرو روند.

فشار جو

ما در عمق اقیانوسی از هوا یعنی آتمسفر یا جو زندگی میکنیم. هر جسم، هر ذره و هر شیئی واقع بر روی زمین در معرض تاثیر فشار هوا قرار دارد.

فشار هوا آنقدرها هم کم نیست. بر هر سانتیمتر مربع جسم فشاری معادل یک کیلوگرم وارد میآید.

علت فشار جوی واضح است. هوا نیز همچون آب دارای وزن است و لذا دارای فشاری است (مثل مورد آب) مساوی با وزن ستون هوای واقع بر روی جسم. هر چه از کوه بالاتر رویم بهمان اندازه هوای بالای سر ما کم میشود و در نتیجه فشار جو نیز افت میکند.



شکل ۷۸

دانستن فشار هوا برای مقاصد علمی و امور زندگی مورد نیاز است و برای اندازه‌گیری آن وسائل ویژه‌ای وجود دارد که آنها را هواسنج می‌خوانند.

تهیه هواسنج کار آسانیست. در لوله‌ای با یک انتهای بسته جیوه میریزند. انتهای باز آنرا ابتدا با انگشت گرفته و لوله‌را برمیگردانند و سپس آنرا در ظرف جیوه‌ای فرو می‌برند. در این ضمن جیوه در لوله پائین میآید ولی همه آن بیرون ریخته نمیشود. فضای بالای جیوه بدون تردید فاقد هوا خواهد بود. جیوه در لوله بوسیله فشار هوای خارج بر جای میماند (شکل ۷۸).

صرفنظر از اندازه ظرف جیوه و قطر لوله، جیوه همیشه تقریباً به ارتفاع معینی ۷,۶ سانتیمتر بالا میرود.

اگر طول لوله کمتر از ۷۶ سانتیمتر گرفته شود، در آنصورت لوله همیشه پر از جیوه خواهد بود و ما فضای خالی در بالای آن نخواهیم دید. ستون جیوه ۷۶ سانتیمتر با نیروئی مساوی فشار جو بر پایه خود فشار وارد میآورد.

وزن ستون جیوه بارتفاع ۷۶ سانتیمتر و سطح قاعده ۱ cm^2 در حدود یک و یا دقیقتر — ۱,۰۳۳ کیلوگرم است. این رقم عبارتست از حاصلضرب حجم جیوه که $1 \times 76\ cm^3$ است در چگالی آن یعنی ۱۳,۶. یک کیلوگرم بر یک سانتیمتر مربع همان مقدار فشار عادی جو است.

عدد ۷٦ سانتیمتر بدانمعنی است که چنین ستونی از جیوه با ستونی از جو که بر روی قاعده‌ای به همین مساحت قرار گرفته است متعادل میشود.

با محاسبه سطح زمین از روی فرمول $\pi R^{۲}$؛ معلوم میشود که وزن تمام جو به رقم عظیم ۵×۱۰^{۱۸} کیلوگرم میرسد.

هواسنج را می‌توان به اشکال گوناگون ساخت، در اینجا تنها این نکته مهم است که یک سر لوله باید طوری بسته باشد که بالای سطح جیوه هوا نباشد. فشار جو بر سطح دیگر جیوه تاثیر میکند.

بوسیله هواسنج جیوه‌ای فشار را می‌توان با دقت بسیار زیادی اندازه گرفت. بدیهی است که کاربرد جیوه در اینجا حتمی نیست، مایعات دیگر نیز می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. ولی جیوه سنگین‌ترین مایع است و ارتفاع ستون جیوه در شرائط فشار عادی حداقل خواهد بود.

برای سنجش فشار از واحدهای مختلفی استفاده میشود. اغلب تنها بذکر ارتفاع ستون جیوه به میلیمتر بسنده میکنند. مثلاً، میگویند امروز فشار بیش از حد عادی است و مساوی ۷٦۸ mm Hg (Hg علامت جیوه است) می‌باشد.

با دانستن چگالی جیوه همیشه میتوان فشار را به kgf/cm۲ تبدیل نمود. هر میلیمتر ستون جیوه مساوی ۱٫۳٦ gf/cm۲ است.

فشار ۷٦۰ میلیمتر Hg را گاهی آتمسفر فیزیکی مینامند و فشار یک کیلوگرم بر سانتیمتر مربع را آتمسفر فنی.

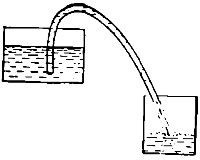
در فیزیک غالباً از واحد فشار دیگری یعنی «بار» نیز استفاده میشود.

$$۱ \text{ بار} = ۱۰^{٦} \text{ din/cm}^{۲}$$

از آنجا که یک گرم نیرو معادل ۹۸۱ دین است، یک «بار» تقریباً معادل یک/ آتمسفر میباشد و اگر نسبت دقیقتر آنرا بخواهیم فشار عادی جو مساوی ۱۰۱۳ میلی‌بار است.

هواسنج جیوه‌ای آنقدرها هم مناسب نیست. اولاً باز گذاشتن سطح جیوه بعلت زهراگین بودن بخار آن مطلوب نیست، بعلاوه هواسنج جیوه‌ای قابل حمل و نقل نیست.

هواسنج‌های فلزی – «آنروئیدها» (یعنی بی‌هوا) فاقد این نواقصند.



شکل ۷۹

این هواسنجها را باید دیده باشید. دستگاهی است به شکل جعبه گردو کوچک فلزی با عقربه و جدول درجه‌دار که معمولاً بر روی آن مقادیر فشار بصورت سانتیمترهای ستون جیوه ثبت گردیده است.

جعبه فلزی از هوا تخلیه شده و درپوش آنرا فشار فنری نگاه میدارد، چون در غیر اینصورت فشار جو آنرا به درون میفشارد و له میکند، با تغییر فشار، در پوش بجانب درون یا بیرون انحنأ میبابد.

عقربه طوری به در پوش وصل شده است که موقع انحنأ آن بدرون براست منحرف میشود.

این هواسنج‌را با مقایسه با هواسنج جیوه‌ای درجه‌بندی میکنند.

قبل از اندازه‌گیری فشار با این هواسنج فراموش نکنید با انگشت بدان تلنگر بزنید، چون عقربه صفحه هواسنج در معرض مقاومت ناشی از اصطکاک قرار دارد و معمولاً روی شاخص اندازه‌گیری قبلی گیر میکند.

سیفون نیز که وسیله بسیار ساده‌ایست بر اساس فشار جو عمل میکند. راننده‌ای میخواهد برفیقش که بنزینش تمام شده است کمک کند. چطور می‌تواند بنزین‌را از باک اتومبیل خود درآورد؟ او که نمی‌تواند آنرا مثل قوری کج کند.

برای این کار راننده از یک لوله لاستیکی استفاده میکند. یک سر آنرا داخل باک بنزین میکند و با سر دیگر هوای نوله را میمکد و سپس با حرکتی سریع سر آزاد لوله‌را با انگشت فشرده و آنرا در سطحی پائین‌تر از ارتفاع باک بنزین نگاه میدارد. حالا دیگر میشود انگشت‌را برداشت — بنزین از لوله لاستیکی بیرون خواهد ریخت (شکل ۷۹).

لوله خمیده لاستیکی همان سیفون است. در اینجا نیز مایع بهمان علت جریان در لوله مستقیم و شیبدار بحرکت درمیآید. در هر دو حالت، مایع به پائین سرازیر میشود.

برای بکار انداختن سیفون فشار جو لازم است. فشار هوا دائما به مایع فشار میاورد و از قطع جریان آن در لوله جلوگیری میکند.

اگر فشار جو نبود، ستون مایع در نقطه انحناء سیفون قطع میشد و مایع واقع در لوله به هر دو طرف سرازیر میگشت.

سیفون موقعی شروع بکار میکند که مایع در زانوی راست (باصطلاح زانوی «آبریز») آن پائین‌تر از سطح مایعی که زانوی دیگر داخل در آن شده است قرار گیرد. در غیر اینصورت مایع پس ریخته خواهد شد.

چگونه بفشار جو پی‌بردند

جوامع متمدن باستان از تلمبه‌های تنفسی یا مکشی آگاه بودند. بیاری این تلمبه‌ها آب به بلندی زیادی بالا برده میشد. آب با اطاعت شگفت‌انگیزی بدنبال پیستون این تلمبه‌ها میرفت.

فلاسفه باستان که در باره علل این امر می‌اندیشیدند به نتیجه جالب و پر معنای زیر رسیدند: آب از آنرو در پی پیستون می‌رود که طبیعت از خلاء بیمناک است و روی این اصل بین آب و پیستون هیچوقت فضای آزاد نمی‌ماند.

روایت میکنند که استادکاری تلمبه‌ای تنفسی برای باغ کنت توسکانی اهل فلورانس ساخت که پیستون آن می‌بایست آب‌را به ارتفاع ۱۰ متر بالا بکشد. اما هر چه کوشیدند توفیقی در کارشان حاصل نشد. به آب تا ۱۰ متر بدنبال پیستون بالا میرفت، ولی بعد از آن پیستون از آب جدا میگشت و همان فضای خالی که طبیعت از آن بیم داشت ایجاد میشد.

وقتیکه برای توضیح این پدیده به گالیله متوسل شدند او پاسخ داد که طبیعت واقعاً از فضای تهی می‌ترسد، ولی تا حد معینی. شاگرد گالیله توریچلی از این واقعه بعنوان انگیزه‌ای استفاده کرد و در سال ۱۶۴۳ میلادی آزمایش مشهور خود با لوله پر از جیوه را بمرحله عمل درآورد. این تجربه‌را ما اخیراً تشریح کردیم — تهیه هواسنج جیوه‌ای همان آزمایش توریچلی است.

توریچلی با گرفتن لوله‌ای بارتفاع بیش از ۷۶ سانتیمتر، در بالای جیوه فضای خالی ایجاد کرد، (آنرا غالباً بافتخار وی خلاء توریچلی می‌نامند) و بدینسان وجود فشار جو را مدلل ساخت.

توریچلی با این تجربه حیرت و تعجبی‌را که از عدم توفیق استادکار

کنت توسکانی پدید آمده بود از بین برد. در واقع معلوم شد که آب تا چند متر با فرمانبرداری بدنبال پیستون تلمبه تنفسی خواهد رفت. این حرکت تا زمانی ادامه خواهد داشت که ستون آب دارای قاعده بمساحت ۱ cm² از لحاظ وزن برابر یک کیلوگرم نشده باشد. چنین ستون آبی ۱۰ متر ارتفاع خواهد داشت. پس معلوم شد که چرا طبیعت از فضای خالی بیم دارد... ولی فقط تا ارتفاع ده متر، نه بیشتر از آن.

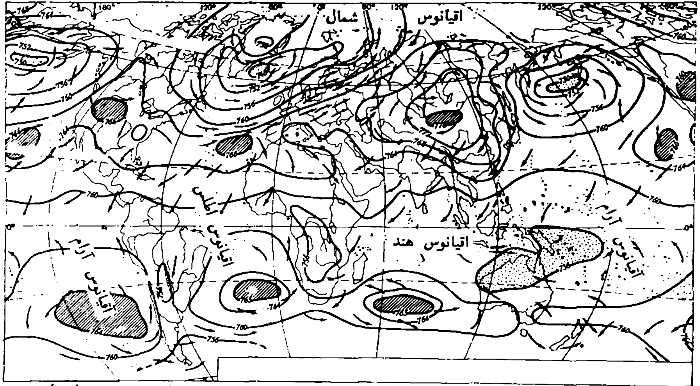
در سال ۱۶۵٤ میلادی، یعنی ۱۱ سال پس از کشف توریچلی، شهردار ماگدبورگ اتوفن گریکه تاثیر فشار جورا با روشنی تمام نشان داد. شهرت وی در این امر بیشتر نه معلول ماهیت فیزیکی خود آزمایش، بلکه مرهون جنبه نمایشی آن بود.

دو نیمکره مسی را بوسیله حلقه درزبندی بهم متصل نموده و از شیری روی یکی از آنها تعبیه شده بود هوای داخل کره را تخلیه کردند. پس از اینکار جداسازی دو نیمکره از هم ممکن نشد. توصیف مفصل آزمایش گریکه محفوظ مانده است. فشار جو بر نیمکره‌هارا اکنون می‌توان محاسبه کرد: چون قطر کره ۳۷ cm بود نیروی موثر بر آن تقریباً معادل یک تن میشد. برای جدا ساختن نیمکره‌ها گریکه فرمان داد تا هر یک از آنها را بوسیله طنابی که از حلقه‌های متصل بر جدار خارجیشان گذرانده شده بود، به هشت اسب به‌بندند. اسبها قادر به جدا کردن نیمکره نشدند. نیروهای هشت اسب (مخصوصاً میگوئیم هشت نه شانزده اسب، زیرا هشت اسب دیگر فقط جنبه نمایشی داشتند و بهمین منظور هم بسته شده بودند و میشد آنها را با حفظ همان نیروی موثر بر نیمکره‌ها، با یک قلاب کوفته‌شده بر دیوار تعویض نمود) برای جدا ساختن نیمکره‌های ماگدبورگ کفایت نکرد.

اگر بین دو جسم مماس برهم فضای خالی باشد، این اجسام بسبب فشار جو بسادگی از هم جدا نخواهند شد.

فشار جو و هوا

نوسانات فشار مربوط به تغییر هوا دارای خصلت بسیار نامنظمی هستند. زمانی می‌پنداشتند که تنها عامل فشار تعیین‌کننده هواست.



ایزوبارها (خطوط فشار جو واحد) به میلیمتر ستون جیوه

مراکز مناطق فشار زیاد

جهات عمده جریانهای هوا

مراکز مناطق فشار کم

شکل ۸۰

از اینرو تا امروز هم روی هواسنجها نوشته‌هائی از قبیل هوای صاف، خشک، بارانی، طوفان و حتی در برخی از آنها «زلزله» هم دیده میشود.
واقعاً تغییر فشار نقش بزرگی در تغییرات هوا دارد، ولی این نقش تعیین‌کننده نیست.

فشار متوسط و یا عادی در سطح دریا مساوی ۱۰۱۳ میلی بار است. نوسانات فشار نسبتاً زیاد نیست. فشار بندرت پائین‌تر از ۹۴۰ تا ۹۳۵ و فراتر از ۱۰۵۵ الی ۱۰۶۰ میلی بار میرود.

پائین‌ترین فشار در ۱۸ اوت ۱۹۲۷ میلادی در دریای چین ۸۸۵ میلی‌بار و بالاترین آن — در حدود ۱۰۸۰ میلی‌بار، در ۲۳ ژانویه ۱۹۰۰ میلادی در ایستگاه بارنائول در سیبری مشاهده شد (این ارقام مربوط به سطح دریا هستند).

در تصویر ۸۰ نقشه مورد استفاده هوا شناسان برای تجزیه و تحلیل تغییرات هوا کشیده شده است. خطوط منقوش بر روی نقشه را ایزوبار می‌نامند. نقاط واقع بر روی هر یک از این خطوط دارای فشار یکسان و معینی هستند که مقدار آن نوشته شده است. به مناطق حداکثر و حداقل فشارها — به «قله‌ها» و «چاههای» فشار توجه کنید.
جهت و نیروی باد و توزیع فشار جو ارتباط دارد.

فشار در نقاط مختلف سطح زمین یکسان نیست و فشار بیشتر، هوا را به مواضع کم فشار میراند. بنظر میآید که باد باید در جهت عمود بر ایزوبارها بوزد، یعنی به آنجا که افت فشار سریعتر است، اما نقشه بادها چیز دیگری نشان میدهد. در جریان فشار هوا نیروی کریولیس دخالت میکند و تصحیحات خود را که بسیار قابل ملاحظه‌اند بعمل میاورد.

ما میدانیم که جهت تاثیر نیروی کریولیس بر هر جسم در حال حرکت در نیمکرهٔ شمالی نیز در سمت راست سیر حرکت آنست. این امر در باره ذرات هوا نیز صدق میکند. این ذرات بهنگام جابجا شدن از مواضع پرفشار به مناطق دارای فشار کمتر، بجای حرکت در جهت عمود بر ایزوبارها تحت تاثیر نیروی کریولیس براست منحرف شده و در نتیجه جهت وزش باد با ایزوبارها تقریباً زاویه ۴۵ درجه‌ای تشکیل میدهد. تاثیری اینقدر زیاد از نیروئی به این کوچکی واقعاً شگفت‌آور است. علتش اینست که موانع موجود در راه

تاثیر نیروهای کریولیس، یعنی اصطکاک اقشار هوا نیز بسیار ناچیز است.

تاثیر نیروی کریولیس بر جهت بادها در «قله‌ها» و «چاچهای» فشار از اینهم جالب‌تر است. تحت تاثیر نیروی کریولیس هوا ضمن دور شدن از «قله» فشار، بصورت اشعه به همه جهات جریان نمی‌یابد، بلکه روی خطوطی منحنی، بشکل مارپیچی حرکت میکند. این جریانات مارپیچی هوا در یک سمت واحد به پیچش درآمده و در منطقه پر فشار گردبادی بوجود می‌آورد که توده‌های هوا را در جهت حرکت عقربه‌های ساعت جابجا میکند. شکل ۲۸ (به صفحه ۸۵ مراجعه کنید). بروشنی چگونگی تبدیل حرکت شعاعی به حرکت مارپیچی را در حیطه تاثیر نیروی ثابت منحرف کننده نشان میدهد.

عین همین جریان در بخش فشار پائین نیز روی میدهد. در صورت فقدان نیروی کریولیس، هوا بطور یکنواخت، بصورت اشعه به تمام جهات به این منطقه سرازیر میشد. ولی ضمن راه، توده‌های هوا براست منحرف میشوند. در این مورد، چنانکه از شکل پیدا است، گردبادی بوجود میآید که هوا را در خلاف جهت حرکت عقربه ساعت بحرکت در میآورد.

بادهای مناطق کم فشار را سیکلون و بادهای مناطق پرفشار را آنتی‌سیکلون می‌خوانند.

نباید فکر کرد که هر سیکلونی بمعنای طوفان است. وزش و گذار سیکلون‌ها و یا آنتی سیکلون‌ها از شهر محل زندگی ما پدیده‌ای است عادی که البته غالبا با تغییر هوا مربوط است. در بسیاری از موارد، نزدیک شدن سیکلون بیانگر آغاز هوای بد و آنتی سیکلون بمفهوم شروع هوای خوب است. ولی ما در راه پیشگویان هوا گام نمی‌زنیم.

قانون ارشمیدس

وزنه‌ای را به قپان فلزی می‌آویزیم. فنرکش میآید و وزن آنرا نشان میدهد. وزنه را در همانحال که به قپان آویخته است، در آب فرو می‌بریم. آیا قپان وزن دیگری را نشان خواهد داد؟ آری. مثل اینکه

از وزن جسم کاسته شده است. اگر این آزمایش با وزنه آهنی یک کیلوگرمی انجام گیرد «کاهش» وزن تقریبا ۱۴۰ گرم خواهد بود. علت امر چیست؟ واضح است که نه جرم وزنه و نه نیروی جاذبه زمین نمی‌توانستند تغییری بیابند. علت کاهش وزن تنها دریک چیز است: وزنه بعد از اینکه به آب انداخته شد، تحت تاثیر نیرویی مساوی ۱۴۰ گرم از پائین به بالا قرار گرفت. منشأ این نیروی دافع که بوسیله دانشمند بزرگ باستان ارشمیدس کشف شده از کجا است؟ قبل از اینکه به بررسی وضع جسم جامد در آب بپردازیم، وضع «آب در آب» را مورد بررسی قرار میدهیم.

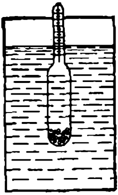
حجم دلخواهی از آب را در تصورمان در نظر میگریم و می‌بینیم که با وجود داشتن وزن به ته ظرف نمیرود. چرا؟ پاسخ این سؤال روشن است: فشار هیدروستاتیکی آبی که این حجم را احاطه کرده است. این بدانمعنی است که برآیند این فشار در حجم مورد نظر مساوی وزن آب بوده و در امتداد خط قائم متوجه بالاست.

حال اگر همین حجم را با جسم جامدی اشغال کنیم، واضح است که فشار هیدروستاتیکی تغییری نخواهد یافت.

پس بنا بر این بر هر جسم غوطه‌ور درآب در نتیجه فشار هیدرو- ستاتیک نیروئی وارد میآید که در امتداد خط قایم متوجه بالا است و قدر مطلق آن مساوی وزن آب جابجا شده بوسیله جسم میباشد. این است قانون ارشمیدس.

روایت میکنند که ار شمیدس در حال آب‌تنی در خزینه حمام روی این مسئله فکر میکرد که چگونه میتوان از اختلاط نقره در تاج طلا اطلاع یافت. نیروی دافع را شخص هنگام آب‌تنی بوضوح احساس میکند. بدینسان قانون با تمام سادگی درخشانش بطور ناگهانی و غیر منتظره بر ارشمیدس کشف شد. ارشمیدس با فریاد «اوریکا» (یعنی «یافتم») از خزینه بیرون پرید و بدنبال تاج گرانقیمت به اطاقها دوید تا بی‌درنگ کاهش وزن انرا در آب تعیین کند.

میزان کاهش وزن جسم در آب به گرم برابر وزن مقدار آبی است که بوسیله جسم جابجا شده است. با دانستن وزن آب فوراً حجم آن که با حجم تاج یکی است معین میشود. و از روی حجم و وزن



شکل ۸۱

تاج می‌توان چگالی آنرا تعیین کرد. از آنجا که چگالی طلا و نقره معلوم است پیدا کردن مقدار نسبی آمیزه مشکل نخواهد بود.

بدیهی است که قانون ارشمیدس برای هر مایعی صادق است. اگر چگالی مایع را ρ و حجم جسم غوطه‌ور در آنرا V بگیریم، وزن مایع بیرون رانده شده یعنی نیروی دافع مساوی ρgV خواهد بود.

نحوه عمل دستگاه‌های ساده‌ای که خواص فراورده‌های مایع را کنترل میکنند بر قانون ارشمیدس متکی است. اگر الکل و یا شیر با آب مخلوط باشد، چگالی آنها دگرگون میشود و از روی چگالی میتوان درباره ترکیب آنها قضاوت کرد. بکمک چگالی‌سنج این اندازه‌گیری با سرعت و سهولت انجام میگیرد (شکل ۸۱).

چگالی‌سنج که در مایع گذاشته شود، بسته به چگالی مایع کمتر ویا بیشتر در آن فرو میرود.

آنگاه که نیروی ارشمیدس با وزن چگالی‌سنج برابر گردد، چگالی‌سنج در حالت موازنه قرار میگیرد.

چگالی‌سنج را درجه‌بندی میکنند و چگالی از روی خط درجه بندی که بموازات سطح مایع قرار گرفته است خوانده میشود. چگالی‌سنجهائی را که برای کنترل الکل بکار برده میشوند الکل‌سنج و چگالی‌سنجهای مخصوص شیر را لاکتومتر مینامند.

چگالی متوسط بدن انسان کمی بیش از یک میباشد. آنهائی که بلد نیستند شنا کنند در آب شیرین غرق میشوند. چگالی آب شور بیش از یک است، اما در اکثر دریاها میزان نمک زیاد نیست و چگالی آب آنها از چگالی بدن انسان کمتر است. چگالی آب در خلیج قره‌بغازگل در دریای خزر ۱٫۱۸ است که از چگالی متوسط بدن انسان زیادتر می باشد. در این خلیج امکان غرق شدن وجود ندارد. و میتوان بر روی آب دراز کشید و بخواندن کتاب مشغول شد.

یخ بر روی آب شنا میکند. اما گفتن «روی آب» در این مورد خیلی هم بجا نیست. چون چگالی یخ ۱۰ درصد از آب کمتر است و

بنا بر این بر طبق قانون ارشمیدس تقریباً ۰٫۹ حجم یخ در زیر آب خواهد بود. بهمین جهت است که برخورد کشتی‌های دریاپیما با کوههای یخ خیلی خطرناک است.

اگر ترازوئی در هوا در حالت موازنه باشد، بدانمعنی نیست که در خلاء هم در همین حالت قرار خواهد داشت. قانون ارشمیدس بهمان میزان آب برای هوا نیز صادق است. بر جسم واقع در هوا نیز نیروی دافعی برابر وزن هوای هم حجم آن تاثیر میکند. در هوا وزن جسم کمتر از خلاء است. هر قدر حجم جسم بیشتر باشد مقدار کاهش وزن بیشتر خواهد بود. یک تن چوب بیش از یک تن سرب کاهش وزن دارد. اگر بشوخی سؤال شود که بین یک تن چوب و یک تن سرب کدامیک سنگینتر است، باید پاسخ داد یک تن سرب سنگینتر از یک تن چوب است، اگر آنهارا در هوا وزن کنیم.

در مورد اجسام کوچک مقدار کاهش وزن در هوا ناچیز است. اما اگر قطعه‌ای باندازه مثلاً یک اطاق را وزن کنیم، دهها کیلوگرم از «دست میدهیم».

برای تعیین کاملاً دقیق وزن جسم باید مقدار کاهش وزن در هوا را در نظر گرفت و تصحیح لازم را انجام داد.

نیروی ارشمیدسی در هوا ساختن انواع بالن‌ها، آئروستاتها و دیریژ-ابل‌هارا میسر میسازد. برای این منظور باید گاز سبکتر از هوا در اختیار داشت.

اگر بالن دارای حجم $1\ m^3$ را از هیدروژن که یک متر مکعب آن ۰٫۰۹ کیلوگرم وزن دارد پر کنیم، نیروی بالابر یعنی تفاضل نیروی ارشمیدسی و سنگینی گاز برابر :

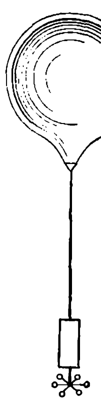
$$۱٫۲۹\ \text{kgf} - ۰٫۰۹\ \text{kgf} = ۱٫۲\ \text{kgf}$$

خواهد شد. در اینجا ۱٫۲۹ kg/m^3 چگالی هواست.

به چنین بالنی می‌توان وزنه یک کیلوگرمی آویخت، بدون اینکه مزاحم پرواز آن بر فراز ابرها باشد.

بدیهی است که در حجمها نسبتاً کوچک یعنی چندین صد متر مکعب، بالنهای هیدروژنی قادر خواهند بود بارهای خیلی سنگین‌را بهوا بلند کنند.

نقیصه جدی بالنهای هیدروژنی در آتش‌زا بودن هیدروژن می‌باشد. هیدروژن با هوا مخلوط قابل انفجاری را بوجود میآورد. تاریخ بالن‌سازی همیشه با سوانح توام بوده است. بدینجهت وقتی هلیوم پیدا شد آنرا برای پر کردن بالنها مورد استفاده قرار دادند. هلیوم دو بار از هیدروژن سنگینتر است و بنا بر این نیروی بالابری بالن حاوی هلیوم کمتر است. ولی آیا این تفاوت خیلی مهم خواهد بود؟ نیروی بالابری بالن به حجم ۱ متر مکعب مملو از هلیوم از تفاضل ۱,۲۹ kgf− ۰,۱۸kgf = ۱,۱۱ kgf بدست میآید. مشاهده میشود که نیروی بالابری فقط بمیزان ۸٪ کم شد، در حالیکه جوانب مثبت هلیوم کاملاً آشکار است.



شکل ۸۲

بالن هوائی اولین دستگاهی بود که انسان بکمک آن بهوا رفت. بالنهای دارای سبد نشیمن نفوذناپذیر را تا به امروز برای پژوهش اقشار فوقانی جو بکار می‌برند. این بالنها بنام ماوراء جو مشهورند و تا ارتفاعات بیش از ۲۰ km بالا میروند.

در حال حاضر بالنهای مجهز به انواع وسایل اندازه‌گیری که نتایج بدست آمده را بوسیله رادیو مخابره میکنند (شکل ۸۲) وسیعاً مورد استفاده قرار میگیرند. اینگونه گمانه‌های رادیوئی حامل فرستنده کوچک با باطری هستند که درجات رطوبت، حرارت و فشار در ارتفاعات مختلف جو را با علائم شرطی مخابره میکند.

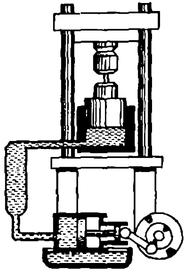
می‌توان بالن هدایت ناشونده‌ای را راهی سفری دور دست نمود و محل فرود آمدن آنرا با دقت معین نمود. برای این کار لازم است که بالن تا ارتفاع زیادی، در حدود ۲۰ تا ۳۰ کیلومتر اوج گیرد. در این ارتفاعات جریانات هوا بسیار پایدارند و مسیر بالن می‌تواند از قبل بخوبی مورد محاسبه قرار گیرد. در صورت لزوم می‌توان نیروی بالابری بالن‌را بطور خود کار، با خارج ساختن مقداری از گاز و یا جدا ساختن قسمتی از وزنه‌های مخصوص موازنه تغییر داد.

سابقاً برای پرواز در هوا از بالنهائی که روی آنها موتور پروانه‌دار نصب شده و دیریژابل (یعنی «قابل هدایت») نامیده میشد استفاده میکردند. به این بالنها شکل مناسبی که قابلیت نفوذ آنهارا در هوا بیشتر کند داده میشد. دیریژابلها نتوانستند با هواپیماها رقابت کنند. آنها حتی در مقایسه با هواپیماهای ۳۰ سال پیش خیلی حجیم‌اند، قابلیت هدایتشان خوب نیست، سرعتشان کم و «اوج پرواز»شان کوتاه است. ولی با همه این، برخی عقیده دارند که دیریژابلها برای حمل بار ممکن است مفید واقع شوند.

فشار میلیونها آتمسفر

ما هر روز با فشارهای زیاد بر مساحات کوچک برخورد میکنیم. مثلاً، ببینیم فشاری که به سر سوزن وارد میآید چگونه است. فرض کنیم سر سوزن و یا میخ دارای اندازه خطی ۰,۱ میلیمتر باشد. در اینصورت مساحت نوک تیز آن مساوی ۰,۰۰۰۱ سانتیمتر مربع خواهد بود. اگر بر این میخ نیروی مختصری معادل ۱۰ کیلوگرم اثر کند، فشار وارد بر سر میخ ۱۰۰۰۰۰ آتمسفر خواهد بود. باین ترتیب مشاهده میشود که چرا اشیاء نوک تیز با فشار کمی با عماق اجسام سخت فرو میروند.

از این مثال برمیآید که ایجاد فشار زیاد بر سطوح کوچک کاری است کاملاً معمولی، ولی اگر بخواهیم بر سطوح بزرگ فشار زیاد وارد کنیم، قضیه شکل کاملاً دیگری بخود میگیرد.



شکل ۸۳

در آزمایشگاهها فشار زیاد بوسیله منگنه های قوی مثلاً منگنه‌های هیدرولیکی، ایجاد میشود (شکل ۸۳). فشار منگنه به پیستون کم مساحتی منتقل میگردد و پیستون بداخل محفظه‌ای که درون آن میخواهند فشار زیاد بوجود آورند رانده میشود.

بدینسان بدون زحمت خاصی ایجاد فشار چند هزار آتمسفری میسر میگردد. ولی ایجاد فشارهای مافوق زیاد مستلزم آزمایش مرکبتری است. چون ممکنست ماده‌ای که محفظه از آن ساخته شده تاب تحمل چنین فشارهائی را نیاورد.

در اینجا طبیعت به ما کمک میکند. بدینطریق که فلزات تحت تاثیر فشارهای فوق‌العاده زیاد در حدود ۲۰۰۰۰ آتمسفر خیلی سخت و محکم میشوند. از اینرو دستگاه ایجاد فشار مافوق زیادرا در مایعی که تحت فشار در حدود ۳۰۰۰۰ آتمسفر قرار دارد فرو می‌برند. در اینصورت، در محفظه درونی (و باز هم بوسیله پیستون) میشود فشاری تا صدها هزار آتمسفر بوجود آورد. بالاترین فشار بمیزان ۴۰۰۰۰۰ آتمسفر را فیزیکدان امریکائی بریجمن بدست آورد.

نباید تصور شود که توجه به ایجاد فشارهای مافوق زیاد جنبه تفننی دارد. تحت تاثیر چنین فشارها پدیده‌هائی بوجود میایند که ایجاد آنها به شیوه‌های دیگر امکان‌پذیر نیست. در سال ۱۹۵۵ میلادی الماس مصنوعی درست کردند که برای تهیه آن فشار ۱۰۰۰۰۰ آتمسفری باضافه گرمای ۲۳۰۰ درجه‌ای لازم بود.

فشارهای مافوق زیاد حدود ۳۰۰۰۰۰ آتمسفر بر مساحات بزرگ‌را می‌توان با انفجار مواد منفجره جامد و مایع — نیتروگلیسرین، تروتیل و غیره بوجود آورد.

درون بمب آتمی بهنگام انفجار، فشار بمراتب بیشتری که‌تا 10^{16} آتمسفر میرسد بوجود میاید.

فشار انفجار مدت بسیار کوتاهی ادامه می‌یابد. در اعماق اجرام آسمانی و از جمله البته در کره زمین فشارهای فوق‌العاده زیاد و دائمی وجود دارد. فشار در مرکز کره زمین تقریباً حدود ۳ ملیون آتمسفر است.

نیروهای سطحی

آیا میشود از توی آب با بدن خشک بیرون آمد؟ البته میشود، برای این کار باید ماده‌ای که با آب خیس نمیشود به بدن مالید. به انگشت خود پارافین بمالید و آنرا در آب فرو کنید — وقتیکه

انگشتتان را از آب بیرون میاورید متوجه میشوید که خشک است، غیر از دو سه قطره آب روی پارافین که با حرکتی سبک تکانده میشود.

در این حالت میگویند که آب پارافین‌را خیس نمیکند. جیوه نیز تقریباً نسبت به تمام اجسام جامد دارای همین خاصیت است: چرم، شیشه، چوب و دیگر اجسام جامدرا بخود آغشته نمیسازد.

آب خواص متفاوت دارد — به برخی از اجسام میچسبد و از تماس با برخی دیگر اجتناب میورزد. آب سطوح چرب‌را خیس نمیکند، ولی شیشه پاک‌را خوب خیس میکند و چوب و کاغذ و پشم‌را خیس میکند.

اگر قطره آبی‌را بر سطح شیشه تمیزی منتقل کنیم، قطره پهن میشود و بصورت قشر بسیار نازکی درمیآید. اگر همانند این قطره را روی پارافین بچکانیم، همان حالت قطرگی خود (شکل کروی که تحت تاثیر نیروی ثقل کمی فشرده است) را حفظ خواهد کرد.

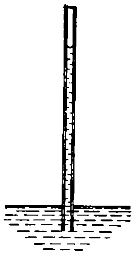
از جمله موادی که تقریباً بهمه چیز «میچسبند» نفت سفید است. نفت سفید ضمن پهن شدن روی شیشه و یا فلز قادر است از محفظه‌اش که کیپ بسته نشده باشد بیرون نشت کند. لکه نفت سفید می‌تواند تا مدت مدیدی ایجاد ناراحتی کند. این مایع با اشغال سطح گسترده‌ای بدرون هر روزنه‌ای میخزد و به لباس نفوذ میکند. از اینرو بوی نامطبوع آن تا مدتی شخص‌را آزار میدهد.

تر نشدن اجسام ممکن است پدیده‌های جالبی ببار آورد. سوزنی را بگیرید و به آن پیه بمالید و آهسته از پهنا بر سطح آبش نهید. سوزن غرق نمیشود. اگر با دقت نگاه کنید متوجه خواهید شد که سوزن سطح آب را فشرده و آرام بر فرورفتگی ایجاد شده قرار گرفته است. اما با یک فشار سبک سوزن به ته ظرف روانه میشود. برای اینکار لازم است که بخش قابل ملاحظه‌ای از آن در آب باشد.

این خاصیت جالب بوسیله حشرات شناگر مورد استفاده قرار میگیرد که بدون اینکه پاهای خودرا تر کنند بسرعت بر روی آب حرکت میکنند.

از خاصیت تر کردن برای پرعیار کردن سنگ‌فلزات بوسیله شناور ساختن آنها در آب (فلوتاسیون) استفاده میشود. واژه فلوتاسیون بمعنی شناوری است. ماهیت این پدیده از اینقرار است: سنگ‌فلز را که خوب ریز کرده‌اند در تغار آب میریزند و مقدار کمی روغن مخصوص

به آن اضافه میکنند. این روغن باید دارای این خاصیت باشد که ذرات سنگ‌فلز را تر کند، ولی ذرات سنگهای معدنی زائد و بیمصرف را تر نکند. در موقع بهم زدن مایع قطعات کوچک سنگ‌فلز بروغن آغشته میشوند. بعد، به این آش سیاه‌رنگی که از سنگ معدن و آب و روغن ترکیب یافته است، هوا دمیده میشود. تعداد زیادی حباب کوچک هوا بصورت کف بوجود میآید. این حبابها بالا می‌آیند. اساس پروسه فلوتاسیون بر این پایه مبتنی است که ذرات آغشته به روغن به حبابها میچسبند حبابهای بزرگ مثل بالن دانه‌های کوچک را با خود بالا می‌برند.



شکل ۸٤

سنگ‌فلز داخل کف در سطح مایع قرار میگیرد، در حالیکه سنگ معدنی زائد در ته ظرف جمع میشود. کف‌را جمع میکنند و برای تغلیظ روانه میسازند تا از آن «ماده پرعیار» یا باصطلاح «کنسانتره» بدست آورند که نسبت اختلاط سنگ معدنی زازئد و بیمصرف آن دهها بار کمتر است.

نیروهای هم‌چسبی سطوح قادرند هم سطحی مایعات در ظروف مرتبطه‌را برهم زنند. صحت این اسررا بآسانی می‌توان مورد آزمایش قرار داد.

اگر لوله شیشه‌ای باریکی‌را (که قطر آن جزئی از میلیمتر است) در آب فرو کنیم، بر خلاف قانون ظروف مرتبطه سطح آب در آن فوری شروع به بالا آمدن میکند و بمیزان قابل توجهی بر سطح آب ظرف گشاد فزونی میگیرد (شکل ۸٤).

علت چیست؟ چه نیروهائی وزن ستون آب‌را که در لوله بالا رفته است نگه میدارند؟ در پاسخ به این پرسش باید بگوئیم که بالا رفتن آب در لوله بوسیله نیروهای هم‌چسبی آب و جدار شیشه انجام گرفته است.

نیروهای هم‌چسبی سطحی تنها در موقعی با وضوح تمام نمودار میگردد که صعود مایع در لوله‌های بحد کافی نازک صورت گیرد. هر چه لوله باریکتر باشد مایع بالاتر میرود و پدیده با وضوح بیشتری

بچشم میخورد. این پدیده‌های سطحی را با نام لوله‌های مورد آزمایش نامگذاری میکنند. این لوله‌ها که قطر مجرای آنها حدود اعشار میلیمتر است، لوله‌های شعری (موئین) نام دارند. بالا رفتن مایع در لوله‌های نازک‌را نیز پدیده موئین می‌نامند.

آب در لوله موئین تا چه حد بالا میآید؟ معلوم میشود که آب در لوله یک میلیمتری ۱٫۵ میلیمتر بالا میآید. اگر قطر لوله ۱۵ بار کمتر شده و به ۰٫۰۱ میلیمتر برسد ارتفاع بالا رفتن آب بهمان اندازه بیشتر میشود.

بدیهی است که صعود مایع تنها بشرط تر شدن ممکن خواهد بود. بسادگی میتوان دریافت که جیوه در لوله شیشه بالا نخواهد رفت. بر عکس جیوه در لوله‌های شیشه‌ای پائین میرود. تماس با شیشه آنقدر برای جیوه «غیر قابل تحمل» است که میکوشد سطح مشترک را به حداقلی که نیروی ثقل اجازه میدهد برساند.

اجسام زیادی هستند که از چیزی شبیه سیستم لوله‌های بسیار نازک تشکیل یافته اند. درون این اجسام پیوسته پدیده‌های موئین مشاهده میشود.

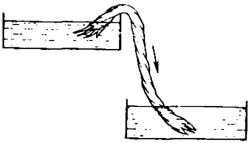
رستنیها و درختان دارای مجموعه کاملی از مجاری دراز و منافذ میباشند که قطر مجاری آنها کمتر از یک صدم میلیمتر است. باین ترتیب نیروهای موئین رطوبت خاک را تا بلندی لازم بالا کشیده و آب را به بدنه گیاه میرسانند.

کاغذ خشک‌کن از این لحاظ جالب است. پس از اینکه لکه جوهری بر کاغذ شما ریخته شد، بجای اینکه صبر کنید خشک شود، ورق خشک‌کن را گرفته انتهای آنرا در قطر جوهر فرو میکنید و ملاحظه میکنید که جوهر بسرعت علیه نیروی ثقل بالا میدود.

در اینجا یک پدیده تیپیک موئین رخ میدهد. اگر کاغذ خشک‌کن‌را زیر میکروسکوپ نگاه کنیم، میتوانیم ساختار آن را ببینیم. این کاغذ از شبکه کم تراکم الیاف سلولزی ترکیب یافته است که باهم مجاری باریک و درازی را تشکیل میدهند. همین مجاری است که نقش لوله‌های موئین را بازی میکنند.

فتیله‌ها نیز دارای چنین سیستم منافذ و مجاری هستند که از

الیاف تشکیل یافته‌اند. نفت سفید از طریق فتیله برای سوختن بالا میرود. از فتیله میشود سیفون نیز درست کرد. برای اینکار باید آنطور که در شکل ۸۵ نشان داده شده است یک سر فتیله را در استکان آب سرخالی داخل کرد و سر دیگر آنرا از دهانه استکان خم نموده و وارد ظرفی که پائین‌تر قرار گرفته است کرد.



شکل: ۸۵

در تکنولوژی رنگرزی نیز اغلب از قابلیت جذب مایع بوسیله مجاری باریک متشکل از نخ های پارچه استفاده میشود.

خشتهای آفرینش

عناصر

جهانی که ما را احاطه کرده از چه ترکیب یافته است؟ نخستین پاسخهائی که به این پرسش داده شده و ما از آنها اطلاع داریم متعلق به یونان باستان و مربوط به ۲۵۰۰ قرن پیش است.

این پاسخها بقدری عجیب و غریب بنظر میرسند که ما اگر بخواهیم منطق اندیشمندان عهد باستان را برای خواننده توضیح بدهیم باید صفحات زیادی از این کتاب را بدان اختصاص دهیم. مثلاً فلس میگفت که همه چیز از آب ترکیب یافته، آناکسیمن معتقد بود که جهان از هوا ساخته شده است و هراکلیت همه چیز را در جهان مرکب از آتش میدانست.

چون اینگونه توضیحات به عقل نمیگنجید، بعدها «دوستداران خرد و تدبیر» (معنی کلمه یونانی «فیلوسوف» چنین است) مجبور شدند بر تعداد مبانی اولیه یا عناصر (در جهان باستان مبنای اولیهٔ ترکیب عالم را عنصر مینامیدند) بیافزایند. امپدوکل چهار عنصر بر میشمرد: زمین، آب، هوا و آتش. ارسطو تصحیحاتی قطعی (برای مدت مدیدی) بر این نظر وارد کرد.

بعقیده ارسطو کلیه اجسام از مادهٔ واحدی ترکیب مییابند. ولی این ماده میتواند خواص گوناگونی بخود بگیرد. این خواص اولیه چهاراند: سرما، گرما، رطوبت و خشکی. اگر خواص اولیه ارسطو را دو بدو با هم جمع کنیم و آنها را به مادهای نسبت دهیم، عناصر امپدوکل بدست میآید، باین طریق که از ماده خشک و سرد زمین درست میشود، از ماده خشک و گرم — آتش، از ماده مرطوب و سرد — آب و از ماده مرطوب و گرم — هوا.

ولی فلاسفه باستان بعلت اینکه در پاسخ دادن به بسیاری از پرسشها عاجز بودند، به خواص چهارگانه یک «جوهر الهی» نیز افزودند. این جوهر الهی نیروی، مافوق الطبیعه است که همچون استاد ماهر میتواند خواص عناصر گوناگون را در یک جا بریزد و از آن چیزهای نو بسازد. بدیهیست، با استناد به خدا میتوان هر گونه شک و تردیدی را به آسانی توضیح داد.

باین ترتیب مدتی دراز، تقریبا تا قرن هیجدهم، کمتر کسی جرأت میکرد در این عقیده شک کند و در این زمینه پرسشهائی مطرح سازد. تعالیم ارسطو مورد قبول کلیسا قرار گرفت و هرگونه شکی در صحت آن کفر و ارتداد محسوب میشد.

ولی با همه اینها شک و تردید وجود داشت و منشأ پیدایش آن الکیمیا بود. در از منه باستان که ما با خواندن نوشته‌های اعصار کهن میتوانیم به ژرفای آن دست یابیم، انسان میدانست که اجسامی که او را احاطه کرده‌اند قابل تبدیل به اجسامی دیگراند. احتراق، تکلیس مواد معدنی، تهیه همبسته‌های فلزات پدیده‌هائی کاملاً معلوم بودند.

همه اینها ظاهرا با تعالیم ارسطو مغایرت نداشت. در هر تغییری، باصطلاح «دز» یا اندازه‌های عناصر تغییر مییافت. اگر جهان فقط از چهار عنصر ترکیب مییابد پس امکانات تبدیل اجسام باید خیلی زیاد باشند. باید فقط به این راز پی برد که چه باید کرد تا از هر جسم بتوان جسم دیگری بدست آورد.

چه جالب و فریبا بود تلاشهائی که بخاطر ساختن طلا صورت میگرفت، یا برای یافتن «سنگ فلسفی» ویژه و خارق‌العاده بعمل میآمد، سنگی که به تصور جویندگانش میتوانست به صاحبش ثروت، قدرت و جوانی ابدی ببخشد. علم تهیهٔ طلا، «سنگ فلسفی» و بطور کلی تبدیل جسمی به جسم دیگر را اعراب «الکیمیا» مینامیدند.

تلاش مردمانی که زندگی خود را وقف حل این مساله میکردند، قرنها ادامه داشت. آن کیمیاگران نتوانستند طلا بسازند و سنگ فلسفی را بیابند، ولی در عوض بسیاری معلومات ارزنده در باره تبدیل اجسام اندوختند. و همین معلومات بود که سر انجام حکم مرگ الکیمیا را اعلام داشت. در قرن هفدهم برای بسیاری اشخاص این مساله

روشن گشت که شماره مواد اصلی بنیادی یا عناصر از چهار خیلی بیشتر است. معلوم شد که جیوه، سرب، گوگرد طلا و آنتیموان موادی تجزیه ناپذیراند و نمیتوان گفت که این مواد از عناصر ساخته شده‌اند. بر عکس، میبایست آنها را در شمار عناصر جهان در آورد.

در سال ۱٦٦۸ در انگلستان کتاب رابرت بویل زیر عنوان «شیمیدان شکاک یا شکیات و تناقضات نسبت به عناصر کیمیاگران» انتشار یافت. در این کتاب تعریف کاملا تازه‌ای از عنصر داده شده بود. در آنجا دیگر عنصر غیر مادی احساس ناپذیر و اسرارآمیز وجود نداشت. بلکه عنصر ماده بود و جزء مرکبهٔ جسم.

این تعریف با تعریف معاصر مفهوم عنصر مطابقت دارد.

فهرست عناصر بویل زیاد نبود. بویل آتش را هم به فهرست صحیح افزود. ولی پندارهای مربوط به خواص اولیه تا مدتها بعد از او باقی بود. حتی در فهرست دانشمند بزرگ فرانسوی لاووازیه (۱۷٤۳ — ۱۷۹٤) که وی را بنیادگزار شیمی میدانند نیز در ردیف عناصر واقعی عناصر بی‌وزنی هم نظیر گرمازا و ماده نوری مشاهده میشوند.

در نیمه اول قرن هیجدهم ۱۵ عنصر معلوم بود و تا پایان قرن شماره آنها به ۳۵ ارتقاء یافت. البته از میان آنها فقط ۲۳ عنصر عناصر واقعی بودند. بقیه یا عناصر غیر موجود بودند و یا مواد مرکبی نظیر هیدرات سدیم و پتاسیم.

در اواسط قرن نوزدهم در رهنمودهای شیمی از بیش از ۵۰ ماده تجزیه ناپذیر نام برده میشد.

قانون‌دوره‌ای شیمیدان بزرگ روسی مندله‌یف راه را برای یافتن آگاهانه عناصر کشف نشده گشود. در اینجا هنوز زود است که ما از این قانون صحبت کنیم فقط این نکته را متذکر میشویم که مندله‌یف با این قانون خود معین کرد که چگونه باید به جستجوی عناصری که هنوز کشف نشده‌اند پرداخت.

تا آغاز قرن بیستم کلیه عناصری که در طبیعت با آنها بر خورد میشود، کشف شده بودند. شمارهٔ آنها ۸۸ بود.

حدود ۲۰۰۰ سال پیش در روم قدیم قصیده‌ای به رشته نظم در آمد. سرایندهٔ قصیده شاعر رومی لوکرتسی کار و عنوانش «طبیعت اشیاء» بود.

لوکرتسی در قصیده‌اش با اشعاری غرا از نظرات دموکریت، فیلسوف یونان قدیم، در بارهٔ جهان صحبت کرده است.

نظرات دموکریت عبارت بود از آموزش‌مبنی بر وجود اجزاء بسیار ریز و نامرئی که جهان ما از آنها ساخته شده است. دموکریت هر چه را که مشاهده میکرد میکوشید توضیح دهد.

مثلاً در بارهٔ آب میگفت که آب در حرارت زیاد مبدل به بخاری نامرئی میشود و از بین میرود و در توضیح آن میگفت که این خاصیت آب مربوط به ترکیب و ساختمان درونی آنست.

و یا این مساله که چرا بوی گلها از فاصله زیاد به مشام میرسد.

دموکریت بعد از تحلیل و بررسی این مسائل به این نتیجه رسید که اجسامی که بنظر ما چنین یکپارچه میرسند، در واقع از اجزاء بسیار ریز ترکیب یافته‌اند. این اجزاء در اجسام مختلف به اشکال گوناگونند، ولی آنها بقدری کوچکند که به چشم نمیآیند و بنابراین هر جسمی یکپارچه بنظر میآید.

دموکریت این اجزاء فوق‌العاده ریز را که دیگر تقسیم‌پذیر نبودند و آب و کلیه دیگر اجسام از آنها ترکیب مییافت «اتم» نامیده بود که بزبان یونانی بمعنی «تقسیم‌ناپذیر» است. این حدس عالی اندیشمندان یونان قدیم که در ۲٤ قرن پیش پدید آمد بعدها بدست فراموشی سپرده شد. بیش از یکهزار سال آموزش اشتباه‌آمیز ارسطو در جهان علم و دانش تسلط بلاشریک داشت.

ارسطو ضمن اعتقاد به اینکه کلیه اشیاء میتوانند به همدیگر مبدل شوند وجود اتم را بکلی رد میکرد و میگفت که هر جسمی را میتوان تا الی‌غیرالنهایه تقسیم کرد.

در سال ۱٦٤۷ پی‌یر گلسندی فرانسوی کتابی چاپ کرد که در آن با جسارت تمام نظر ارسطو را رد کرد و نوشت که کلیه اجسام

در جهان از اجزاء تقسیم‌ناپذیر یا اتم ترکیب یافته‌اند. این اتم‌ها از لحاظ شکل و اندازه و وزن با همدیگر تفاوت دارند.
گسندی ضمن تایید نظرات اتمیستهای عهد باستان، آموزش آنان را تکامل بخشیده و توضیح داد که میلیونها اجسام گوناگون طبیعت چگونه بوجود میآیند. او میگفت که برای این کار تعداد زیادی اتمهای گوناگون لازم نیست. چون اتم چیزی همانند مصالح ساختمانی برای خانه‌هاست. همانطور که سه نوع مصالح ساختمانی — آجر و تیر و تخته میتوان تعداد زیادی خانه به انواع و اشکال مختلف ساخت، همانطور هم طبیعت میتواند از سی چهل اتم گوناگون هزارها جسم کاملاً مختلف بسازد. ضمنا در هر یک از آن اجسام اتمهای مختلف بصورت گروههای کوچکی گرد هم میآیند که آن گروهها را گسندی «ملکول» یعنی «انبوه» نامید (از واژه یونانی «ملس» بمعنی توده، انبوه).
ملکولهای اجسام مختلف از لحاظ شماره و نوع اتمهای مرکبه‌شان با هم تفاوت دارند. به آسانی میتوان تصور کرد که از دهها اتم مختلف چه تعداد زیادی ترکیبات گوناگون — که همان ملکولها هستند — میتوان بدست آورد. از اینجا میشود فهمید که چرا اجسام دور و بر ما اینقدر زیاد و گوناگونند.
ولی با همه اینها، در نظرات گسندی اشتباهات زیادی بود. مثلا او معتقد بود که برای سرما و گرما و طعم و بو اتمهای ویژه وجود دارند. او نیز همانند دیگر دانشمندان آن دوران نمیتوانست از تاثیر نظرات ارسطو بکلی آزاد شود و عناصر غیرمادی او را قبول داشت.
آثار م. و. لومونوسف روشنگر بزرگ و بنیادگزار علم در روسیه، متضمن اندیشه‌هائیست که بعدها در تجربه تایید شد. مثلا لومونوسف نوشته بود که ملکول میتواند هم‌جنس و مختلف‌الجنس باشد. در صورت اول، اتمهای هم‌جنس در ملکول گرد آمده‌اند و در صورت دوم، ملکول از اتمهائی تشکیل یافته است که با هم تفاوت دارند. اگر جسم از ملکولهای هم‌جنس تشکیل یافته باشد، آنرا باید ساده شمرد. برعکس، اگر از ملکولهای مرکب از اتمهای مختلف تشکیل یافته باشد، لومونوسف آنرا جسم مختلط مینامید.
حالا ما خوب میدانیم که اجسام گوناگون طبیعت واقعا یکچنین ساختاری دارند. مثلاً گاز اکسیژن را در نظر بگیریم: هر ملکول آن

دارای دو اتم همجنس اکسیژن میباشد. این ملکول یک ماده ساده است. ولی اگر اتمهای تشکیل دهندهٔ ملکول‌ها مختلف باشند، آن ماده یک ترکیب شیمیائی «مختلط» و مرکب است. ملکولهای آن از اتمهای عناصر شیمیائی که جزو این ترکیب هستند، تشکیل مییابد.

همین مفهوم را بگونه دیگری نیز میتوان بیان کرد: هر ماده ساده‌ای از اتم‌های یک عنصر شیمیائی تشکیل مییابد و هر ماده مرکب از اتمهای دو یا چند عنصر ترکیب یافته است.

اندیشمندانی چند از اتم صحبت میکردند و دلایل منطقی در اثبات وجود آن میآوردند. ولی کسی که اتم را واقعا به عرصه علم داخل نمود و آنرا موضوع تحقیقات کرد دانشمند انگلیسی دالتون بود. دالتون نشان داد که برخی قانونمندیهای شیمی را فقط با داشتن تصوراتی از اتم و استفاده از ان میشود توضیح داد.

اتم بعد از دالتون با استحکام تمام داخل عرصه علم شد. ولی تا مدتی زیاد هنوز دانشمندانی یافت میشدند که «به وجود اتم باور نداشتند». یکی از آنها در اواخر قرن گذشته نوشته بود که بعد از گذشت چند دهسال «اتم را فقط باید در میان گرد و غبار کتابخانه‌ها جستجو کرد».

البته حالا اینگونه قضاوتها مضحک بنظر میرسند. ما اکنون آنقدر از جزئیات «زندگی» اتم اطلاع داریم که شک در وجود آن هم‌تراز شک در وجود خورشید است.

شیمیدانان اوزان نسبی اتمها را تعیین کردند. ابتدا وزن اتم هیدرژن بعنوان واحد وزن اتمی پذیرفته شد. با این معیار، وزن اتمی ازت تقریبا برابر ۱۴، اکسیژن تقریبا ۱۶ و کلر تقریبا ۳۵٫۵ میباشد. چون ترکیبات اکسیژن بیش از دیگر ترکیبات انتشار دارند، بعدها برگزینی واحدهای نسبی وزن اتمی بگونه‌ای دیگر صورت گرفت، باین معنی که رقم ۱۶٫۰۰۰۰ بعنوان وزن اتمی اکسیژن پذیرفته شد. با این معیار، وزن اتمی هیدرژن برابر ۱٫۰۰۸ است.

فیزیکدانان در نتیجه یکرشته تجربیات جالب توانستند وزن مطلق اتمها را اندازه بگیرند. چون اوزان نسبی معلومست، کافیست وزن ماده‌ای از یک جنس مثلاً هیدرژن بر حسب گرم اندازه‌گیری شود.

البته فیزیکدانان ترازوئی نساخته‌اند که بتوان یک اتم را روی آن قرارداد و آنرا با سنگهای وزنه توزین کرد. آنها برای تعیین وزن اتمها از وسایل دیگر اندازه‌گیری استفاده کرده‌اند که اصمینان به صحت اندازه‌گیری در آنها بهیچوجه کمتر از توزین مستقیم نیست.

باین ترتیب واحد وزن اتمی برابر شد با:

$$m = ۱٫۶۶ \times ۱۰^{-۲۴} g$$

برای اینکه تصوری از کوچک بودن این رقم داشته باشید متذکر میگردیم که اگر از هر نفر انسان روی زمین (شماره اهالی کره زمین بیش از ۳ میلیارد نفر است) یک میلیارد ملکول بگیریم، میدانید جمعا چقدر ماده گرد آورده‌ایم؟ فقط چند میلیونیم گرم.

کمیت معکوس m را عدد آوگادرو مینامند:

$$N = \frac{۱}{m} = ۶٫۰۲۳ \times ۱۰^{۲۳}$$

مفهوم این رقم کلان از اینقرار است: از ماده‌ای آنقدر بر میداریم که وزن آن به گرم برابر وزن نسبی اتم یا M شود. این مقدار یک گرم اتم یا یک گرم ملکول نامیده میشود (غالبا بمنظور اختصار اصطلاحات، بجای «گرم — ملکول» میگویند «مل»). وزن ملکول به گرم برابر Mm است. بنابراین نسبت تعداد ملکول‌ها به گرم — ملکول هر ماده عبارت خواهد بود از

$$\frac{M}{Mm} = N$$

یعنی برابر است با رقم آوگادرو.

گرما چیست؟

تفاوت یک جسم گرم با جسم سرد در چیست؟ تا قبل از آغاز قرن نوزدهم به این پرسش چنین پاسخ میدادند: جسم گرم بیشتر از جسم سرد دارای گرمازا میباشد. درست مثل اینست که

بگوئیم سوپ موقعی شورتر است که دارای نمک بیشتری باشد.
پس گرمازا عبارت از چیست؟ در پاسخ به این پرسش میگفتند: «گرمازا ماده گرمائی است، آتش ابتدائی (élémentaire) است». مساله بصورتی مرموز و نامفهوم در میآید. درست به این میماندکه مثلاً بگوئیم: «ریسمان طناب ساده است».

از مدتها پیش در ردیف نظریه گرمازا نقطه نظر دیگری نیز در باره طبیعت گرما وجود داشته است. بسیاری از دانشمندان مشهور قرون ۱۶ تا ۱۸ از این نقطه نظر با حرارت تمام دفاع میکردند.

فرنسیس بکن در کتابش «ارگانون* نو» نوشته بود: «گرما از لحاظ ماهیت خود چیزی بجز حرکت نیست... گرما عبارتست از حرکت متغیر اجزاء بسیار ریز جسم».

ربرت گوک در کتاب «میکروگرافی» اش متذکر میگشت که «گرما حرکت مداوم اجزاء جسم است... جسمی وجود ندارد که اجزاء آن بیحرکت باشند».

لومونوسف (سال ۱۷٤٥) در کتابش «اندیشه علت گرما و سرما» توضیحات روشنتری در همین زمینه داده است. در این اثر وجود گرمازا نفی شده و گفته میشود که «گرما عبارتست از حرکت درونی ذرات ماده».

رمفرد در اواخر قرن هیجدهم این مساله را بطرز بسیار جالبی بیان داشته و میگفت: «هر قدر ذرات تشکیل دهنده جسم شدیدتر حرکت کنند، جسم گرمتر خواهد بود، همانطور که هر قدر زنگ شدیدتر به ارتعاش در آید صدای آن بلندتر خواهد شد».

در این حدسیات جالب که از سطح دانش دوران خود بسیار فراتر بود، اصول و مبانی نظرات معاصر ما در باره طبیعت گرما نهفته بود.

در طبیعت روزهای روشن و ساکت و آرامی هست که برگهای درختان انگار خفته‌اند، حتی موج خفیفی هم سطح صاف و آرام آب رامغشوش نمیکند. همه اطراف در سکونی سنگین و شکوهمند فرو رفته و یخ بسته. جهان مشهود آرمیده است. ولی آیا میدانید

---

*ارگانون — واژه یونانی بمعنی وسیله تفکر یا پژوهش علمی است.

که در این سکون ظاهری، در جهان اتم‌ها و ملکولها چه میگذرد؟

فیزیک معاصر در این باره خیلی چیزها میتواند بگوید. حرکت نامرئی ذراتی که جهان از آنها ترکیب یافته است هیچگاه و در هیچ شرایطی قطع نمیشود.

پس چرا ما این حرکت را نمیبینیم؟ چگونه ذرات جسم حرکت میکنند و خود جسم ساکن است؟..

آیا وقتی به پرواز انبوه پشه‌ها توجه کرده‌اید؟ در هوای بی باد این بدان میماند که توده انبوهی در آسمان آویخته است. ولی درون آن جنب و جوش شدید زندگی حکمفرماست. در آن واحد صدها حشره براست و صدها حشره بچپ شتابان در حرکتند، در حالیکه جمع حشرات همچون توده‌ای انبوه، بدون اینکه شکل خارجیش تغییر کند، سر جای خود ایستاده است.

حرکات نامرئی اتم‌ها و ملکولها هم همینطور نامنظم و توام با هرج و مرج صورت میگیرد. اگر ملکولهائی از حجم خارج شوند، ملکولهای دیگری جای آنها را میگیرند. و چون ملکولهای تازه وارد با قبلیها که از جمع خارج شده‌اند تفاوتی ندارند، جسم همانطور باقی میماند. حرکت نامرتب و پرهرج و مرج ذرات خواص و کیفیات جهان مرئی را تغییر نمیدهد.

ولی ممکنست خواننده بپرسد: همه این حرفها برای چیست؟ این اظهارات با تمام ظاهر زیبا و جالبش چه برتری بر نظریه گرمازا دارد؟ مگر کسی حرکت ابدی گرمائی ماده را دیده است؟

ضمنا حرکت گرمائی ذرات را میتوان بوسیله میکروسکپ ساده مشاهده کرد. این پدیده را نخستین بار، بیش از صد سال پیش، گیاهشناس انگلیسی براون مشاهده کرد.

براون ضمن مشاهده میکروسکپی ساختار درونی رستنیها متوجه شد که ذرات بسیار ریز ماده که در شیره رستنی شناورند، بلاوقفه در کلیه جهات در حرکت میباشند. بدیهیست، گیاهشناس علاقمند شد بداند که چه نیروهائی ذرات را وادار به حرکت میکنند؟ شاید اینها موجودات زنده‌ای هستند؟ دانشمند بعنوان آزمایش، خاک رس را در آب مخلوط کرد و ذرات مخلوط را زیر میکروسکپ مشاهده نمود و دید که حتی ذره‌های این جسم مسلما بیروح نیز در حالت

سکون نیستند و در حرکتی دائمی، نامنظم و در هم و بر هم میباشند. ذرات هر چه کمتر بودند سریعتر حرکت میکردند. گیاهشناس مدتی زیاد به آن قطره آب مینگریست، ولی هیچوقت نشد که ببیند حرکت ذرات قطع شده است. گوئی نیروهائی نامرئی دائما آنها را هل میدادند.

حرکت ذرات براون همان حرکت گرمائی است. حرکت گرمائی مختص ذرات بزرگ و کوچک، انبوهمهای متراکم ملکولها، ملکولها و اتم‌های مجزا است.

انرژی همیشه حفظ میشود

بدینسان، جهان از اتم‌های متحرک ترکیب یافته* است. اتمها دارای جرمند و اتم متحرک‌دارای انرژی سینتیک میباشد. البته جرم اتم بمیزان غیرقابل تصوری کوچک و انرژی آن بسیار ناچیز است، ولی بطوریکه میدانیم شماره اتم‌ها میلیاردها میلیارد است.

حالا خاطر نشان میسازیم که هرچند ما از قانون بقاء انرژی صحبت کرده‌ایم، ولی این قانون بقاء بقدر کافی جامع نبود. تکان (اسپولس) و گشتاور (سمان) در تجربه حفظ میشدند، ولی انرژی فقط در حالت ایدآل — در صورت نبودن اصطکاک محفوظ میماند. در صورتیکه انرژی در واقع همیشه کاهش مییافت.

ولی در مباحث پیشین ما از انرژی اتم صحبتی نمیکردیم. طبیعتا چنین فکری بوجود میآید: لابد آنجا که ما ظاهرا متوجه کاهش انرژی میشدیم، انرژی بگونه‌ای مخفی از دیدگان ما به اتم‌های جسم انتقال مییافت.

اتمها از قوانین مکانیک پیروی میکند. البته مکانیک اتمها ویژگیهائی دارد (در این باره در کتاب دیگری صحبت خواهد شد). ولی این مساله در موضوع مورد بحث ما تغییری بوجود نمیآورد. در موضوع قانون بقاء انرژی مکانیکی، اتمها با اجسام بزرگ تفاوتی ندارند.

یعنی حفظ کامل انرژی فقط موقعی معلوم خواهد شد که علاوه بر انرژی مکانیکی جسم انرژی درونی آن جسم و محیط اطراف نیز حساب شود. فقط در این صورت است که قانون جامع (اونیورسل) خواهد بود.

انرژی کامل جسم از چه عواملی تشکیل میبابد؟ یکی از عوامل متشکله‌ٔ آنرا ما در بالا نام بردیم و آن مجموعه انرژی سینتیک کلیه اتمهاست. ولی نباید فراموش شود که اتمها روی همدیگر متقابلاً تاثیر میکنند. باین ترتیب پتانسیل این تاثیر متقابل هم اضافه میشود. پس انرژی کامل جسم برابر است با مجموع انرژی سینتیک ذرات آن و انرژی پتانسیل تاثیر متقابل آنها.

فهم این موضوع دشوار نیست که انرژی مکانیکی یک جسم کامل فقط جزئی از انرژی کامل است. چون وقتی جسم در حال سکون قرار دارد، ملکولهای آن متوقف نمیشوند و از اعمال تاثیر متقابل روی همدیگر باز نمی‌ایستند. انرژی حرکت گرمائی ذرات که در جسم در حال سکون باقی میماند و انرژی تاثیر متقابل ذرات مجموعا انرژی درونی جسم را تشکیل میدهند. بنابراین انرژی کامل جسم برابر است با مجموع انرژی‌های مکانیکی و درونی.

انرژی مکانیکی جسم کامل شامل انرژی جاذبه، یعنی انرژی پتانسیل تاثیر متقابل ذرات جسم با کره زمین نیز میباشد.

با بررسی انرژی درونی، ما ضایعه انرژی را کشف نخواهیم کرد. وقتی ما طبیعت را از ورای شیشه‌هائی مینگریم که جهان را میلیونها بار بزرگ میکنند، منظره فوق‌العاده موزون و هماهنگی بنظر ما میرسد. هیچگونه ضایعه یا اتلاف انرژی مکانیکی در بین نیست، آنچه که هست فقط تبدیل این انرژی درونی جسم یا محیط. پس باین ترتیب، آیا کار بهدر رفت؟ خیر! انرژی صرف تسریع حرکت نسبی ملکولها یا تغییر وضع استقرار متقابل آنها شد.

ملکولها مطیع قانون بقاءٔ انرژی مکانیکی اند. در جهان ملکولها نیروهای سایش وجود ندارد. جهان ملکولها با تبدیلهای متوالی انرژی پتانسیل به انرژی سینتیک و بر عکس اداره میشود. فقط در جهان زمخت اشیاءٔ بزرگ که ملکولها را در نظر نمیگیرد، «انرژی تلف میشود».

اگر در پدیده‌ای انرژی مکانیکی کلاً یا جزئاً تلف شود، بهمان مقدار بر انرژی درونی اجسام و محیطی که در آن پدیده شرکت دارند، افزوده خواهد شد. بدیگر سخن، انرژی مکانیکی بدون هیچ ضایعه و اتلافی به انرژی ملکولها یا اتمها مبدل میگردد.

قانون بقاءٔ انرژی بمنزله حسابدار خیلی جدی فیزیک است. در

هر پدیده‌ای در آمد و هزینه باید با هم توازن داشته باشند. اگر این توازن در آزمایشی حاصل نشود معلوم میشود که چیز مهمی مورد توجه قرار نگرفته است. قانون بقاء انرژی در این مورد اخطار میدهد، یعنی توجه پژوهنده را به این جاب میکند که اشتباهی در کارش رخ داده است، باید آزمایش را تکرار کند، بر وقت اندازه‌گیریها بیافزاید و علت ضایعه را در یابد. در این راه فیزیکدانان بارها به اکتشافات مهم دست یافته و هر بار بیش از پیش به صحت کامل و بی‌خدشهٔ این قانون بسیار مهم یقین حاصل کرده اند.

کالری

ما تا کنون دو واحد انرژی میشناسیم: ارگ و کیلوگرمومتر که بنظر میرسید کافی‌اند. ولی در بررسی پدیده‌های حرارتی، از همان ابتدا بر حسب سنت مرسوم واحد سومی هم بکار برده شده است که کالری نام دارد.

بعدا ما خواهیم دید که فهرست واحدهائی که برای تعیین انرژی پذیرفته شده‌اند به کالری پایان نمییابد.

شاید برای هر مورد جداگانه بکاربردن واحد انرژی «ویژه» همان مورد مناسب و نتیجه‌بخش باشد. ولی در موارد نسبتا مرکب که در آن، انتقال انرژی از نوعی به نوع دیگر مطرح است، وجود واحدهای جداگانه سر در گمی غیرقابل تصوری بوجود خواهد آورد.

بمنظور ساده کردن محاسبات، در سیستم جدید واحدها (SI) واحدی بنام ژول (به صفحه ۱۰۰ مراجعه شود) برای کار و انرژی و مقدار گرما در نظر گرفته شده است. ولی با در نظر گرفتن اینکه اولاً سنتهای مرسوم را بسادگی و فوری نمیتوان از بین برد و در ثانی سیستم جدید هم مدتها وقت میخواهد تا مورد استفادهٔ همگان قرار گیرد و سیستم یگانه واحدها شود، بهتر است ما با کالری — این واحد «از بین رفتنی» کمیت گرما از نزدیک آشنا شویم.

کالری کوچک (cal) مقدار انرژی است که لازمست به یک گرم آب داده شود تا آنرا ۱ درجه گرم کند.

کلمه «کوچک» را باید ذکر کرد چون گاهی اوقات کالری «بزرگ» هم بکار برده میشود که هزار بار بزرگتر از واحد برگزیده است (کالری بزرگ را غالبا با علامت k cal نشان میدهند که بمعنی «کیلوکالری» است).

نسبت بین کالری و واحدهای مکانیکی کار — ارگ یا کیلوگرمومتر را با گرم کردن آب بطریقه مکانیکی بدست میآورند. بارها از این آزمایشها شده است. مثلاً حرارت آب را با بهم‌زدن شدید آن میشود بالا برد. کار مکانیکی مصروفه برای گرم کردن آب را میتوان با دقت کافی تعیین کرد. از اینگونه اندازه‌گیریها چنین نتیجه‌ای بدست آمد که:

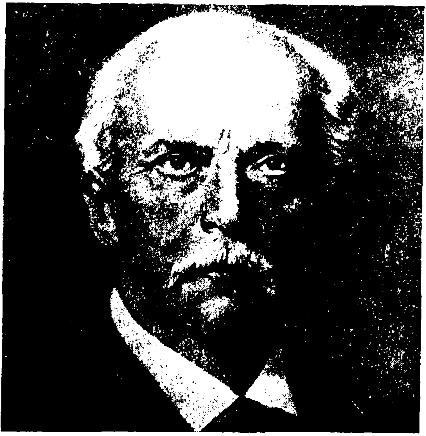
$$\text{cal} = ۰{,}۴۲۷ \ \text{kgfm} = ۴{,}۱۸ \ \text{j}$$

چون واحدهای انرژی و کار یکی هستند، بنابراین کار را هم میتوان با کالری اندازه گرفت. برای بالابردن وزنهٔ یک کیلوگرمی به ارتفاع یک متر باید ۲,۳۵ کالری مصرف شود. این بیان البته بنظر غیرعادی و عجیب میآید، چون مقایسه بالابردن بار با گرم‌کردن آب مقایسه‌ای ناجور است. بهمین جهت در مکانیک از کالری استفاده نمیکنند.

نظری به تاریخ

قانون بقاء انرژی فقط موقعی میتوانست فرموله شود که تصورات در باره طبیعت مکانیکی گرما بقدر کافی روشن شده و تکنیک مساله معادل بودن گرما و کار را که از لحاظ عملی حائز اهمیت است، در میان گذاشته باشد.

نخستین آزمایش برای تعیین رابطه کمی بین گرما و کار توسط فیزیکدان مشهور رمفرد (۱۷۵۳ — ۱۸۱۴) بعمل آمد. او در کار‌خانه توپسازی کار میکرد. وقتی لولهٔ توپ را سوراخ میکنند گرما بوجود میآید. چگونه باید آنرا ارزشیابی کرد؟ چه چیزی را میتوان بعنوان معیار گرما پذیرفت؟ رومفرد فکر کرد که کار انجام شده در جریان



هرمان هلمهولتس (۱۸۲۱ — ۱۸۹۲) — دانشمند مشهور آلمانی. هلمهولتس با احراز موفقیتهای شایان در رشته‌های فیزیک و ریاضیات و فیزیولوژی کار میکرد. او برای نخستین بار (در سال ۱۸٤۷) قانون بقاء انرژی را بزبان ریاضی تشریح کرد و خصلت عام آنرا متذکر گشت. هلمهولتس در رشته ترمودینامیک نیز تحقیقات ارزنده‌ای کرده و نتایج برجسته‌ای بدست آورده است. او نخستین بار ترمودینامیک را در پژوهش جریانهای شیمیائی بکار برده است. هلمهولتس با تحقیقاتش در زمینه حرکت طوفانی مایعات اصول هیدرودینامیک و آئرودینامیک را بنیاد نهاد. دانشمند در رشته‌های آکوستیک و الکترومغناطیس پژوهشهای ارزنده‌ای دارد. او نظریه فیزیکی موسیقی را پیشرفت داده ودر کلیه پژوهشهایش در زمینه فیزیک شیوه‌های نیرومند و جالب ریاضی را بکار برده است.

سوراخکاری را با گرم کردن مقدار معین آب بدرجه حرارت معین مربوط کند. در این پژوهش نخستین بار این فکر که گرما و کار باید معیار واحدی داشته باشند با روشنی تمام بیان گشت.

گام بعدی در راه کشف قانون بقاء انرژی درک این واقعیت بود که مصرف یا از بین رفتن کار با پیدایش میزان متناسبی گرما همراه است، و باین ترتیب معیار مشترک گرما و کار بدست آمد.

اولین تعریف برای معادل مکانیکی گرما را فیزیکدان فرانسوی سادی کارنو داد. این انسان برجسته که در سال ۱۸۳۲ در سن سی و شش سالگی بدرود زندگی گفت، نوشته‌ای از خود بجای گذاشت که ۵۰ سال بعد انتشار یافت. باین ترتیب کشفی که کارنو انجام داد نامعلوم ماند و به پیشرفت علم کمکی نکرد. کارنو در آن اثر خود حساب کرده بود که انرژی لازم برای بالابردن یک مترمکعب آب به ارتفاع یک متر برابر است با انرژی که برای گرم کردن یک کیلوگرم آب بمیزان $۲,۷^\circ$ لازم میباشد (رقم صحیح $۲,۳^\circ$ است).

در سال ۱۸۴۲ پزشک هیلبرون دکتر یولیوس ربرت مایر نخستین اثرش را انتشار میدهد. گرچه مایر مفاهیم فیزیکی را که ما با آنها آشنائی داریم بکلی بطرز دیگری مینامد، ولی با همه این، از مطالعه دقیق اثر چنین نتیجه‌ای بدست میاید که در آن، نکات عمده قانون بقاء انرژی تشریح شده است. مایر انرژی درونی («حرارتی»)، انرژی پتانسیل جاذبه و انرژی حرکت جسم را تشخیص میدهد. او سعی میکند که از روی استنباطات کاملاً عقلانی مسلم بودن بقاء انرژی را در جریان تبدلات گوناگون استنتاج کند. برای وارسی این حکم در تجربه باید معیار واحدی برای اندازه‌گیری این انرژی‌ها در دست داشت. مایر از روی محاسبه چنین نتیجه‌ای بدست میآورد که گرم‌کردن یک کیلوگرم آب بمیزان یک درجه هم ارز بالابردن یک کیلوگرم وزن بارتفاع ۳۶۵ متر است.

مایر در کتاب دومش که سه سال بعد بچاپ رسید، عمومیت قانون بقاء انرژی، یعنی امکان بکاربردن آن در مسائل شیمی و زیست‌شناسی و همچنین در پدیده‌های کیهانی را متذکر میگردد. مایر انرژی مغناطیسی، الکتریکی و شیمیائی را هم به اشکال گوناگون انرژی علاوه میکند.

در کشف قانون بقاء انرژی فیزیکدان برجسته انگلیسی جمس پرسکوت جول (در سالفورد انگلستان آبجوسازی داشت) که مستقل از مایر کار میکرد، خدمات بزرگی انجام داده است.
در حالیکه آثار و تحقیقات مایر با گرایش بسوی فلسفه‌ای نامعین مشخص میشود، مشخصه اصلی جول در برخورد کاملاً تجربی او به پدیده‌های مورد پژوهش است. جول به طبیعت سئوال میداد و جوابش را از طریق آزمایشهای ویژه‌ای که با دقت فوق‌العاده انجام میداد میگرفت. شکی نیست که جول در کلیه آزمایشهایش فقط یک فکر را تعقیب میکرد و آن عبارت بود از یافتن معیار واحدی جهت ارزیابی عملیات حرارتی، شیمیائی، الکتریکی و مکانیکی و نشان دادن این که در کلیه این پدیده‌ها انرژی حفظ میشود. جول فکر خودش را باین ترتیب فرموله کرده بود: «در طبیعت نیروئی که کاری انجام میدهد، بدون تاثیر معین از بین نمیرود».
اولین اثر جول ۲۴ ژانویه سال ۱۸۴۳ توسط خود او گزارش شد و ۲۱ اوت همان سال جول نتیجه‌گیریهای خود در باره تعیین معیار واحد گرما و کار را گزارش داد. گرم کردن یک کیلوگرم آب باندازه یک درجه هم‌ارز بالابردن یک کیلوگرم وزن بارتفاع ۴۶۰ متر بود.
در سالهای بعد، جول و برخی دیگر از پژوهشگران مساعی زیادی بکار بردند تا اهمیت معادل حرارتی را دقیقا تعیین کنند و نیز کوشیدند تا عمومیت کامل معادل را نشان دهند. در اواخر سالهای چهلم معلوم شد که بهر طریقی هم که کار به حرارت تبدیل شود، همیشه کمیت گرمائی که بوجود میآید با کمیت کار مصرف شده متناسب خواهد بود. با وجودیکه جول قانون بقاء انرژی را در تجربه ثابت کرد، در آثارش فرمول دقیق و روشنی از این قانون وجود ندارد.
این کار را فیزیکدان آلمانی هلمهولتس انجام داد. گرمان هلمهولتس ۲۳ ژویه سال ۱۸۴۷ در جلسه انجمن فیزیک برلن گزارشی پیرامون اصل بقاء انرژی داد. در این گزارش نخستین بار پایه مکانیکی قانون بقاء انرژی بطرز روشنی تشریح گردید. جهان از اتمها ترکیب یافته است و اتمها دارای انرژی پتانسیل و سینتیک میباشند. اگر جسم یا مجموعه‌ای از اجسام در معرض تاثیرات خارجی قرار

نگیرد، حاصل جمع انرژیهای پتانسیل و سینتیک ذراتی که آن جسم یا مجموعه از آنها ترکیب یافته است، نمیتواند تغییر کند. قانون بقاء انرژی، بطوریکه ما در چند صفحه قبل آنرا تشریح کردیم، نخستین بار بوسیله هلمهولتس فرموله شد.

گزارش مهم هلمهولتس فقط عبارت از فرمولبندی نظریات کلی نبود. هلمهولتس کلیه پدیدهای فیزیکی — حرارتی، شیمیائی و الکترومغناطیسی را بتفصیل مورد بررسی همه طرفه قرار داده، عمومیت اصل تعادل را ثابت کرد و قواعد محاسبه انرژی را معین ساخت.

بعد از این کار هلمهولتس، برای دیگر فیزیکدانان فقط این وظیفه باقی میماند که اصل بقاء انرژی را باز هم در عمل مورد وارسی قرار داده آنرا گسترش دهند. نتایج موفقیت‌آمیز کلیه این پژوهشها باعث شد که در اواخر سالهای دهه پنجاهم سده گذشته قانون بقاء انرژی بعنوان قانون بنیادی طبیعت شناسی مورد پذیرش همگانی قرار گرفت.

در سده بیستم به پدیده‌هائی بر خورد شد که قانون بقاء انرژی را مورد تردید قرار میدادند. ولی بعداً علت برخی تناقضات ظاهری معلوم شد و قانون بقاء انرژی تا امروز هم همیشه از بوته آزمایش موفق و سربلند در آمده است.

ساختار ماده

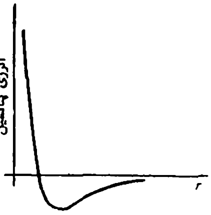
ملکولها

ملکولها از اتمها تشکیل میبابند. اتمها توسط نیروهائی که نیروهای شیمیائی نامیده میشوند در ملکولهابهم می پیوندند. ملکولهایی هستند که از دو، سه، چهار اتم تشکیل میبابند. بزرگترین ملکولها ــ ملکولهای مواد سفیده‌ای هستند که شامل دهها و حتی صدها هزار اتم میباشند.

قلمرو ملکولها خیلی متنوع است. تا کنون شیمیدانان از موادی که از طبیعت گرفته‌اند، میلیونها ماده ایجاد کرده اند که از ملکو- لهای مختلف ساخته شده‌اند.

خواص ملکولها تنها با کمیت اتمهای گوناگونی که در ترکیب آن هستند معین نمیشود، بلکه بعلاوه با این تعیین میگردد که اتمهای آن با چه ترتیبی و بچه شکلی با هم جمع و متحد شده‌اند. ملکول را نباید ساختمانی متشکل از انبوه ساده خشتها دانست. ملکول ساختمانی است با طرح معماری مرکب که در آن هر خشت برای خود جای ویژه و همسایگان کاملاً معینی دارد. یک ساختمان اتمی که تشکیل ملکول را میدهد میتواند کم و بیش سخت باشد. بهر حال هر یک از اتمها نزدیک حالت تعادل خود نوسان میکند و در برخی حالات قسمتهائی از ملکول حول قسمتهای دیگر آن میچرخند و به ملکول آزاد در جریان حرکت گرمائی‌اش اشکال گوناگون و عجیب و غریبی میدهند.

تاثیرات متقابل اتمها را مشروحتر مورد بررسی قرار میدهیم. در شکل ۸۶ منحنی انرژی پتانسیل یک ملکول دواتمی تصویر شده است.



شکل ۸۶

این منحنی شکل خاصی دارد — ابتدا بسوی پائین میرود و بعد انحنا پیدا میکند و تشکیل «چاله‌ای» میدهد و سپس آهسته آهسته به محور افقی که فواصل بین اتمها روی آن برده شده است نزدیک میشود.

ما میدانیم که وضع جسم وقتی استوار است که انرژی پتانسیل آن کمترین مقدار را دارا باشد. وقتی اتمی داخل ترکیب ملکول میشود، در چاله پتانسیل «می‌نشیند» در حالیکه در جوار حالت تعادلش نوسانات گرمائی کوچکی انجام میدهد.

فاصله بین محور شاقولی و ته چاله را میتوان فاصله تعادل نامید. اگر حرکت گرمائی قطع شود اتمها در چنین فاصله‌ای از هم قرار میگیرند.

منحنی انرژی پتانسیل کلیه جزئیات تاثیرات متقابل بین اتمها را نشان میدهد. کلیه اطلاعات مربوط به جذب یا دفع ذره‌ای در فواصل مختلف و افزایش یا کاهش نیروی تاثیر متقابل بهنگام دور یا نزدیک شدن ذرات را میتوان از تحلیل منحنی انرژی پتانسیل بدست آورد. نقاطی که سمت چپ «ته» چاله قرار دارند مربوط به حالت دفعند و بر عکس، قسمتهائی از منحنی که سمت راست ته چاله اند بیانگر جذب میباشند. سراشیبی منحنی دارای اهمیت زیاد است. بدینمعنی که هر قدر منحنی پرشیب‌تر باشد، نیرو بیشتر است.

اتمها که در فواصل دور از هم قرار دارند، همدیگر را جذب میکنند. این نیروی جاذبه با افزایش فاصله بین آنها با سرعت زیادی کاهش مییابد. نیروی جاذبه در صورت نزدیک شدن اتمها به همدیگر زیاد میشود و هنگامیکه اتمها خیلی بهم نزدیک میشوند به حداکثر خود میرسد. اگر اتمها از آن هم بهم نزدیکتر شوند، نیروی جذب شروع به ضعیف شدن میکند و بالاخره در فاصله تعادل، نیروی تاثیر متقابل اتمها به صفر میگراید. اگر اتمها از فاصله تعادل نیز بهم

نزدیکتر شوند، نیروهای دفع بوجود میآنید که خیلی بشدت افزایش میبابند و نزدیک‌شدن باز هم بیشتر آنها را عملاً غیر ممکن میسازند.
فواصل تعادل (از این ببعد ما برای اختصار فقط فواصل خواهیم گفت) بین اتمها در اقسام مختلف اتمها متفاوت‌است.
برای زوجهای مختلف اتمها نه فقط فواصل از محور قائم تا ته چاله، بلکه عمق‌چاله‌ها نیز متفاوتست.
عمق چاله دارای مفهوم ساده است — برای در آمدن از توی چاله انرژی درست برابر عمق آن لازمست. بنابر این عمق چاله را میتوان انرژی رابطه ذرات نامید.
فواصل بین اتمهای ملکولها بقدری کم است که برای اندازه‌گیری آنها واحدهای مناسبی باید برگزید. در غیر اینصورت مجبور میشویم مقدار آنها را مثلاً باین صورت : ۰,۰۰۰۰۰۰۰۱۲ سانتیمتر نشان دهیم. این رقم مربوط به ملکول اکسیژن است.
واحدهائی که برای توضیح جهان اتمها بویژه مناسبند انگستروم نامیده میشوند (نام فامیلی دانشمند سوئدی که این واحدها بنام او نامیده شده‌اند. چون این نام با A شروع میشود ولی تلفظ صحیح آن O است، بنابراین انرا با Å که بالای آن دایره کوچکی است نمایش میدهند).

$$۱\ \text{Å} = ۱۰^{-۸}\ \text{cm}$$

یعنی یک صد میلیونیم سانتیمتر.
فواصل بین اتمهای ملکولها در حدود ۱ تا ٤ انگستروم است. فاصله تعادلی اکسیژن که در بالا به آن اشاره شد برابر ۱,۲ Å را است.
بطوریکه ملاحظه میشود فواصل بین اتمها خیلی کوچکند. برای اینکه تصوری از کوچکی این فواصل داشته باشید، تصور کنید که اگر طنابی را بصورت کمربند بدور خط استوای کره زمین بکشید، طول این کمربند چند برابر پهنای کف دست شما است. بهمین اندازه نیز پهنای کف دست شما از فاصله بین اتمهای ملکول بزرگتر است.
برای اندازه‌گیری انرژی رابطه معمولاً از کالری استفاده میکنند، ولی چون کالری یک ملکول مقدار خیلی ناچیزیست، آنرا برای یک ملکول گرم در نظر میگیرند یعنی برای وزن ملکولی نسبی برحسب گرم.

واضحست که اگر انرژی رابطه برحسب گرم ملکول را به عدد آوگادرو $N = ٦٫٠٢٣ \times ١٠^{٢٣}$ تقسیم کنیم انرژی رابطه یک ملکول بدست خواهد آمد.

انرژی رابطه اتمهای یک ملکول، مثل فواصل بین اتمها، در حدود خیلی کوچکی نوسان میکند.

انرژی رابطه برای همان اکسیژن برابر ١١٦٠٠٠ کالری در هر ملکول گرم، برای هیدرژن ١٠٣٠٠٠ کالری است و الخ.

گفتیم که طرز استقرار اتمها نسبت به یکدیگر در ملکولها کاملاً معین است و در موارد مرکب ساختمانهای پیچیده و بغرنجی را تشکیل میدهند.

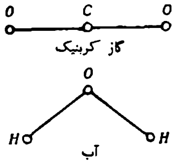
به ذکر چند مثال ساده میپردازیم. در ملکول $CO_٢$ (گاز کربنیک) هر سه اتم در یک ردیف قرار گرفته اند — اتم کربن در وسط است. ملکول آب $H_٢O$ بشکل زاویه است (زاویه ١٠٥ درجه) که در راس آن اتم اکسیژن قرار دارد.

در ملکول امونیاک $NH_٣$ اتم ازت در راس هرم سه سطحی واقع است. در ملکول متان $CH_٤$ اتم کربن در مرکز شکل چهار سطحی با اضلاع برابر قرار دارد که تترائدر (جسم چهار سطحی) نامیده میشود.

اتمهای کربن بنزول $C_٦H_٦$ یک شش‌سطحی تشکیل میدهند. رابطه‌های اتمهای کربن با هیدرژن از کلیه رئوس شش‌سطحی خارج میشوند. کلیه اتمها در یک سطح قرار گرفته‌اند.

شماهای استقرار مراکز اتمهای این ملکولها در اشکال ٨٧ و ٨٨ نشان داده شده‌اند. خطوط نمایشگر رابطه‌ها هستند.

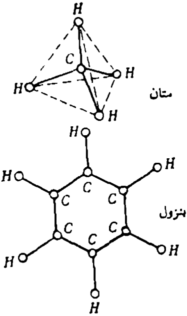
فرض کنیم یک فعل و انفعال شیمیائی انجام گرفت. ملکولهائی



شکل ٨٧

از یک قسم بودند، ملکولهائی از قسم دیگر بوجود آمدند. رابطه های قبلی از بین رفتند و رابطه های تازه‌ای پدید آمدند. برای قطع رابطه های بین اتمها (شکل را بخاطر بیاورید) باید کاری برابر آنچه که برای بیرون آوردن گلوله از توی چاله لازمست صرف شود. و بر عکس، هنگام تشکیل رابطه های تازه، انرژی بوجود میاید — گلوله به ته چاله می‌غلطد.

کدامیک از این دو کار بزرگتر است، کار قطع یا کار ایجاد؟ در طبیعت به فعل و انفعالاتی از هر دو نوع بر خورد میشود.



شکل ۸۸

انرژی اضافی تاثیرگرمائی، یا باختصار — گرمائی تبدیل (فعل و انفعال) نامیده میشود. تاثیرهای گرمائی فعل و انفعالات غالباً کمیتهائی ردیف دهها هزار کالری برحسب مل میباشند. اکثر اوقات تاثیر-گرمائی را بعنوان یک عامل داخل در فرمول فعل و انفعال میکنند. مثلاً، فعل و انفعال احتراق کربن بصورت گرافیت، یعنی ترکیب آن با اکسیژن اینطور نوشته میشود: $C+O_۲=CO_۲+۹۴۲۵۰$ cal این بدانمعنی است که در جریان ترکیب C با $O_۲$ انرژی معادل ۹۴۲۵۰ کالری بوحود میآید.

مجموع انرژیهای درونی اتم گرم کربن در گرافیت و ملکول گرم اکسیژن برابر است با انرژی درونی ملکول گرم گاز کربنیک بعلاوه ۹۴۲۵۰ کالری. بنابر این فرمولهائی نظیر فرمول بالا بیانگر روشن ماهیت برابریهای جبری است که برای کمیتهای انرژی داخلی نوشته شده‌اند.

بکمک این معادلات میتوان تاثیرات گرمائی تبدیلهائی را که در مورد آنها بدلایلی نمیتوان طریقه های مستقیم اندازه‌گیری را بکار برد بدست آورد، و اینک یک نمونه: اگر کربن (گرافیت) را با هیدرژن ترکیب کنیم، گاز استیلن بدست میآید:

$$۲C+H_۲=C_۲H_۲$$

فعل و انفعال باین صورت انجام نمیگیرد. با وجود این میتوان تاثیر گرمائی آنرا پیدا کرد. سه فعل و انفعال مشهور را مینویسیم — اکسیده شدن کربن:

$$۲C + ۲O_۲ = ۲CO_۲ + ۱۸۸۰۰۰$$

اکسیده شدن هیدرژن:

$$H_۲ + \frac{۱}{۲} O_۲ = H_۲O + ۶۸۰۰۰$$

اکسیده شدن استیلن:

$$C_۲H_۲ + \frac{۵}{۲} O_۲ = ۲CO_۲ + H_۲O + ۳۱۲۰۰۰$$

کلیه این برابریها را میتوان بعنوان معادلاتی برای انرژیهای رابطه ملکولها در نظر گرفت. اگر اینطور باشد، میتوان با آنها مثل برابریهای جبری عمل کرد. اگر دو برابری (۱) و (۲) را از برابری (۳) کسر کنیم، نتیجهٔ زیر بدست میآید:

$$۲C + H_۲ = C_۲H_۲ - ۵۶۰۰۰$$

یعنی تبدیل مورد نظر ما با جذب ۵۶۰۰۰ کالری در یک ملکول گرم همراه است.

تاثیر متقابل ملکولها

در این نمیتوان شک داشت که ملکولها متقابلاً جذب میشوند. اگر این حالت جاذبه متقابل ملکولها برای یک لحظه قطع شود، آنوقت کلیه مایعات و اجسام جامد به اجزاء ملکولی خورد و از هم پاشیده میشوند.

در این هم شکی نیست که ملکولها متقابلاً دفع میشوند. زیرا اگر

غیر از این میبود، مایعات و اجسام جامد با سهولت فوق‌العاده‌ای فشرده و منقبض میشدند.

بین ملکولها نیروهائی تاثیر میکنند که از خیلی جهات شبیه نیروهای بین اتمها هستند که شرح آن در بالا بعمل آمد. منحنی انرژی پتانسیل که ما در مبحث قبلی برای اتمها ترسیم کردیم، مشخصات اصلی تاثیرات متقابل ملکولها را صحیحا بدست میدهد. ضمنا بین تاثیرات متقابل تفاوتهای ماهوی وجود دارد.

مثلاً فاصلهٔ تعادل بین اتمهای اکسیژن تشکیل دهنده ملکول را با اتمهای اکسیژن دو ملکول مجاور را که تا حد تعادل در اکسیژن سخت، بهم جذب شده اند باهم مقایسه میکنیم. اختلاف بین آنها کاملاً مشهور است: اتمهای اکسیژنی که تشکیل ملکول را میدهند، در فاصله ۱,۲ Å قرار میگیرند و اتمهای اکسیژن ملکولهای مختلف بهمدیگر بفاصله ۲,۹ Å نزدیک میشوند.

نظیر همین نتایج برای دیگر اتمها نیز بدست میآید. اتمهای ملکولهای بیگانه نسبت بهم در فاصله‌ای دورتر از اتمهای یک ملکول قرار میگیرند. بنابراین جداکردن ملکولها از همدیگر آسانتر از جداکردن اتمها از ملکول است. ضمنا تفاوت انرژیها خیلی بیشتر از تفاوت فواصل است. انرژی لازم برای قطع رابطه بین اتمهای اکسیژن تشکیل دهنده یک ملکول حدود $۱۰۰ \frac{\text{k cal}}{\text{mol}}$ است، در حالیکه انرژی لازم برای جدا کردن ملکولهای اکسیژن کمتر از $۲ \frac{\text{k cal}}{\text{mol}}$ میباشد.

این بدانمعنی است که در منحنی انرژی پتانسیل ملکولها «چاله» دورتر از محور شاقولی قرار دارد و بعلاوه عمق آن خیلی کمتر است.

ولی تفاوت تاثیرات متقابل اتمهای تشکیل دهنده یک ملکول با تاثیرات متقابل ملکولها بهمینجا خاتمه نمییابد.

شیمیدانان نشان دادند که اتمها در داخل یک ملکول با تعداد کاملاً معینی از دیگر اتمها بهم میپیوندند مثلاً اگر دو اتم هیدرژن تشکیل یک ملکول را میدهند دیگر اتم سومی به این منظور به آنها نخواهد پیوست. و اگر یک اتم اکسیژن در آب با دو اتم هیدرژن پیوسته است دیگر پیوستن یک اتم دیگر به آنها غیر ممکن است.

ولی در تاثیرات متقابل بین ملکولها چنین حالتی وجود ندارد. یک ملکول وقتی ملکول مجاورش را بخود جذب میکند بهیچوجه «نیروی جاذبه» اش را از دست نمیدهد. جذب ملکولهای همجوار تا وقتی که جا برای این کار باشد ادامه خواهد داشت.

ممکنست سئوال شود که: «جا برای این کار باشد» یعنی چه؟ مگر ملکول چیزی نظیر سیب یا تخم‌مرغ است؟ البته این مقایسه از لحاظی درست است. چون ملکولها اجسام فیزیکی‌اند که دارای «ابعاد» و «شکل» معین میباشند. فاصله تعادلی بین ملکولها نیز چیز دیگری بجز «ابعاد» ملکولها نیست.

حرکت گرمائی چه صورتی دارد

تاثیرات متقابل بین ملکول‌ها میتواند اهمیتی کم و بیش در «زندگی» آنها داشته باشد.

اختلاف سه حالت جسم (گازی شکل، مایع و جامد) از یکدیگر بستگی به نقشی دارد که تاثیرات متقابل ملکولها در آن اجسام ایفا میکنند.

واژه‌ی «گاز» را دانشمندان وضع کرده‌اند و از واژه‌ی یونانی «chaos» بمعنای بی نظمی و هرج و مرج گرفته شده است.

واقعا هم حالت گازی شکل ماده نمونه بی‌نظمی و هرج و مرج کامل موجود در طبیعت در مورد استقرار متقابل و حرکت ذرات است. چنان میکروسکپی که با آن بتوان حرکت ملکولهای گازی را دید، وجود ندارد، ولی با وجود این، دانشمندان فیزیک میتوانند زندگی این جهان نامرئی را بتفصیل شرح دهند.

در یک سانتیمتر مکعب هوا در شرایط عادی (حرارت معمولی اطاق و فشار یک جو) مقدار بسیار زیادی – تقریبا $۲,۵ \times ۱۰^{۱۹}$ (یعنی ۲۵ میلیارد میلیارد) ملکول وجود دارد. باین ترتیب به هر ملکول حجمی بمیزان ۴×۱۰^{۲۰} cm³ یعنی مکعبی با ضلع $۳,۵ \times ۱۰^{-۷}$ cm = ۳۵ Å میرسد. ولی ملکولها خیلی کوچکند. مثلاً ملکولهای اکسیژن و ازت که

بخش اصلی هوا را تشکیل میدهند، اندازه متوسطی حدود Å ٤ دارند. باین ترتیب فاصله متوسط بین ملکولها ۱۰ برابر اندازه‌ی یک ملکول است. ضمنا این بدانمعنی است که حجم متوسط هوائی که به یک ملکول میرسد تقریبا ۱۰۰۰ بار بیشتر از حجم خود ملکول است.

محوطه مسطحی را تصور کنید که روی آن سکه‌هائی چند بطور نامنظم ریخته باشند. ضمنا در سطح ۱ متر مربع آن ۱۰۰ سکه ریخته باشد. این بدان میماند که بر سطحی برابر یک صفحه کتاب معمولی یک یا دو سکه ریخته شده باشد. ملکولهای گاز هم تقریبا همینطور دور از هم قرار گرفته‌اند.

هر ملکول گاز در حالت حرکت گرمائی دائمی قرار دارد.

یک ملکول را مورد مطالعه قرار میدهیم. مشاهده میکنیم که این ملکول شتابان بسوئی، بطرف راست حرکت میکند. این ملکول اگر در سر راهش مانعی پدید نیاید، با همان سرعت به حرکتش روی خط مستقیم ادامه میدهد. ولی راه این ملکول را تعداد بیشماری ملکو-لهای همجوار سد میکنند. بر خورد بین آنها اجتناب ناپذیر است و ملکولها مثل دو گوی بیلیارد بهم بر خورد میکنند از هم متباعد میشوند. ملکول ما به کدام سو خواهد رفت؟ سرعت آن زیاد خواهد شد یا کم؟ همه گونه حالات ممکنست روی دهد. چون برخوردها میتوانند به انواع گوناگون باشند. ضربه‌ها ممکنست هم از جلو باشند و هم از عقب، هم از راست باشند و هم از چپ، هم قوی باشند و هم ضعیف. واضحست که ملکول مورد مطالعه ما که در این بر خوردهای تصادفی زیر چنان ضربه‌های نامنظم قرار میگیرد، سراسیمه به هر سوی ظرفی که گاز در آن قرار دارد میشتابد.

در این حرکات سراسیمه و شتابان، ملکولها چه مسافتی را بدون برخورد به همدیگر سیپیمایند؟

این مسافت به اندازه‌های ملکولها و به چگالی[1] گاز وابسته است. هر قدر اندازه‌های ملکولها بزرگتر و تعداد آنها در ظرف بیشتر باشد، همانقدر بیشتر بهم برخورد می‌نمایند — طول متوسط حرکت آزاد ملکولها — در شرایط عادی برابر ۱۱×۱۵^{-۶} سانتیمتر، یعنی Å ۱۱۰۰ برای ملکولهای هیدرژن و ۵×۱۰^{-۶} سانتیمتر، یعنی Å ۵۰۰ برای ملکولهای اکسیژن است. یاد آور میشویم که ۵×۱۰^{-۶} سانتیمتر

برابر یک بیست هزارم میلیمتر است که فاصله خیلی کوچکی است. ولی این فاصله در مقایسه با اندازه‌های ملکولها چندان هم کوچک نیست. مثلاً فاصله 5×10^{-6} سانتیمتر برای ملکول اکسیژن بمنزله فاصله ۱۰ متر برای یک گوی بیلیارد است.

ساختار مایعات بکلی متفاوت از ساختار گازها میباشد. ملکولهای گازها دور از هم قرار دارند و خیلی بندرت بهم برخورد میکنند. ولی در مایعات، ملکولها دائما در نزدیکی بلافاصله هم قرار دارند. وضع استقرار ملکولهای جسم مایع شبیه سیب زمینیهائی است که در یک کیسه ریخته باشند. البته با یک تفاوت — ملکولهای جسم مایع در وضع حرکت گرمائی مداوم و نامنظم قرار دارند و بعلت تنگ بودن جا نمیتوانند آزادانه، مثل ملکولهای گاز، حرکت کنند. هر ملکول همیشه، تقریبا در یک جا و در احاطه همسایگان معینی «در جا میزند» و فقط مختصری در حجمی که مایع اشغال کرده است تغییر مکان میدهد. هر اندازه مایع غلیظ‌تر باشد تغییر مکان مزبور کمتر است. ولی حتی در مایع «پرتحرکی» مثل آب، ملکول در فاصله ۳ Å در مدت زمانی جا بجا میشود که ملکول گاز در آن مدت فاصله حرکت آزاد ۷۰۰ Å را می‌پیماید.

در اجسام جامد نیروهای تاثیر متقابل بین ملکولها حرکت گرمائی ملکولها را بصورت کاملاً جدی سرکوب میکنند. در اجسام جامد ملکولها عملاً همیشه در وضع ثابت و بلاتغییر دارند. حرکت گرمائی فقط در این تاثیر میکند که ملکولها دائما در جوار وضع تعادل نوسان میکنند. فقدان تغییر مکانهای سیستماتیک خود دلیل آنست که ما جسم را جامد مینامیم. واقعا هم، اگر ملکولها همسایگانشان را تغییر ندهند، قسمتهای جدا گانه جسم بطریق اولی نسبت به یکدیگر در رابطه تغییرناپذیر خواهند ماند.

قابلیت تراکم اجسام

ملکول‌های گاز مثل قطرات باران که بشدت و با صدائی طبل آسا بر شیروانی خانه‌ها فرو میریزد، به جدار ظرف میخورند، شماره

این ضربه‌ها بسیار زیاد است و تاثیر آنها در مجموع باعث ایجاد چنان فشاری میشود که میتواند مثلاً پیستون موتوری را بحرکت در آورد، بمبی را منفجر سازد و یا بالن هوائی را باد کند. فشارجو، فشاری که سرپوش ظرف آب در حال جوشش را به بالا میپراند، نیروئی که گلوله را از درون لوله تفنگ به خارج میراند — همه اینها تاثیر ضربه‌های تگرگ‌وار ملکول هاست.

فشار گاز به چه عواملی بستگی دارد؟ واضحست که هرچه ضربه وارده از طرف یک ملکول شدیدتر باشد، فشار بیشتر خواهد بود. این هم روشن است که فشار به تعداد ضربه‌هائی که دریک ثانیه وارد میآید بستگی خواهد داشت. هرچه شماره ملکولها درظرف بیشتر باشد، همانقدر ضربه‌ها بیشتر و فشار زیادتر است، یعنی فشار p گاز معین قبل از هرچیز با چگالی آن گاز متناسب است.

اگر جرم گاز ثابت باشد، هر اندازه حجم آنرا کم کنیم چگالی بهمان نسبت زیاد میشود. یعنی فشار گاز در ظرف بسته با حجم آن نسبت معکوس خواهد داشت. بدیگر سخن، حاصلضرب فشار در حجم باید مقدار ثابتی باشد:

$$p \times V = \text{مقدار ثابت}$$

این قانون ساده را فیزیکدان انگلیسی بویل و دانشمند فرانسوی ماریوت کشف کردند.

قانون بویل — ماریوت یکی از نخستین قوانین کمی در تاریخ علم فیزیک است. بدیهیست این قانون در گرمای ثابت صدق میکند.

هرچه بیشتر گاز تحت فشار قرارگیرد، قانون بویل — ماریوت بدتر اجرا میشود. ملکول‌ها بهم نزدیک میشوند و تاثیرات متقابل بین آنها ها شروع به تاثیر در رویه گاز میکند.

قانون بویل و ماریوت در مواردی صادق است که مداخله نیروهای تاثیرات متقابل در زندگی ملکول‌های گاز بکلی نامحسوس باشد. بنابر این قانون بویل — ماریوت را مثل قانون گازهای ایدآل درنظر میگیرند.

منظور از «ایدآل» درینجا «کامل» است. گاز ایدآل یعنی گاز کامل، گازی که بهتر از آن نمیتواند باشد.

مدل یا نمونه هر چه ساده‌تر باشد برای فیزیک ایدآل‌تر است.

چون محاسبات ساده‌تر میشوند و توضیح پدیده‌های فیزیکی سهلتر و روشنتر میگردد. اصطلاح «گازایدآل» به ساده‌ترین شمای گاز اطلاق میشود. روش گازهای خیلی رقیق عملاً با روش گازهای ایدآل تفاوت چندان ندارد.

قابلیت تراکم مایعات خیلی کمتر از قابلیت تراکم گازها است. درمایع ملکول‌ها در «تماس‌باهم» قرار دارند. تراکم فقط عبارت از بهبود استقرار یا بعبارتی بهبود «بسته بندی» ملکولهاست، و اگر فشار وارده خیلی زیاد شود، آن وقت تراکم بافشرده شدن خود ملکول‌ها توام خواهد بود. اینکه نیروهای دفع تا چه حد تراکم یا فشردگی مایعات را دچار اشکال میکنند، از ارقام زیر معلوم میشود. اگر فشار گاز را از یک به دو آتمسفر بالا ببریم حجم گاز نصف می شود، در صورتیکه با همین اعتلای فشار، حجم آب بمیزان $\frac{۱}{۲۰۰۰۰}$ و حجم جیوه فقط بقدر $\frac{۱}{۲۵۰۰۰۰}$ تغییر میکند.

حتی فشار بسیار زیاد اعماق اقیانوسها قادر نیست آب را بطور نسبتا چشمگیری متراکم سازد. فشار یک آتمسفر در ستونی از آب به ارتفاع ده متر ایجاد میشود. بنابرین فشار در عمق ۱۰ کیلومتر برابر هزار آتمسفر است. درین فشار بسیار شدید، حجم آب با نداز‌ه $\frac{۱۰۰۰}{۲۰۰۰۰}$ یعنی فقط $\frac{۱}{۲۰}$ کم میشود.

قا بلیت تراکم یا فشار پذیری اجسام جامد با مایعات فرق چندانی ندارد. دلیل آن واضح است. چون در هر دو مورد، ملکولها در تماس با هم قرار دارند و تراکم جسم میتواند فقط با نزدیک‌تر شدن ملکولها که با شدت همدیگر را دفع میکنند، صورت پذیرد. با فشار-های فوق‌العاده زیاد مثلاً ۵۰ تا ۱۰۰ هزار آتمسفر میتوان فولاد را تا $\frac{۱}{۱۰۰۰}$ و سرب را تا $\frac{۱}{۷}$ حجم آن متراکم ساخت.

ازاین نمونه‌ها دیده میشود که اجسام جامد را در شرایط زمینی نمیتوان بمیزان نسبتا قابل ملاحظه‌ای فشرد و متراکم کرد.

ولی در عالم کاینات اجسامی هستند که مادهٔ آنها بمیزان غیر

قابل مقایسه‌ای فشرده‌تر از مواد زمینی است. ستاره‌شناسان وجود ستارگانی را کشف کرده اند که تراکم یا فشردگی ماده درون آنها تا 10^6 g/cm³ میرسد. بنابرین درون این ستاره‌ها — آنها را کتوله های سفید مینامند («کتوله» بمناسبت ابعاد خیلی کوچکشان، و «سفید» از لحاظ نورانی بودنشان) — باید فشار خیلی زیادی وجود داشته باشد.

تغییر فشار برحسب ارتفاع

با افزایش ارتفاع فشار پائین میآید. نخستین بار این مساله را پریوی فرانسوی بدستور پاسکال در سال ۱۶٤۸ روشن ساخت. آزمایش در کوه پیوددم که پرپو نزدیک آن میزیست صورت گرفت. نتیجه اندازه گیریها نشان داد که بعد از صعود به بالای کوه که ارتفاع آن ۹۷۵ متر است، ستون جیوه در لوله تریچلی باندازه ۸ میلیمتر پائین میآید.

افت فشار هوا در نتیجه افزایش ارتفاع کاملاً طبیعی است. زیرا هر چه از سطح زمین بالاتر رویم، ستون کوتاه تری از هوا بر دستگاه اندازه‌گیری ما فشار وارد خواهد آورد.

در پرواز با هواپیما لابد ملاحظه کرده اید که در دیواره جلوی اطاق مسافران دستگاهی نصب شده است که ارتفاع هواپیما را با دقت، با تقریب ده متر نشان میدهد. این دستگاه آلتیمتر یا ارتفاع‌یاب نام دارد. دستگاه مزبور یک فشارسنج معمولی است که آنرا برحسب ارتفاع از سطح دریا درجه بندی کرده‌اند.

فشار با افزایش ارتفاع افت میکند. برای یافتن فرمول این بستگی، قشری از هوا بمساحت ۱ سانتیمتر مربع واقع بین ارتفاع های h_1 و h_2 را میگیریم. در قشر نسبتا کوچک تغییر چگالی برحسب ارتفاع خیلی کم محسوس است. بنابر این وزن حجم برگزین شده هوا (این حجم استوانه‌ای از هواست به ارتفاع $h_2 - h_1$ و سطح ۱ سانتیمتر مربع) برابر خواهد بود با $mg = \varrho (h_2 - h_1) g$ این وزن است که سبب افت فشار در نتیجه بالا رفتن از ارتفاع h_1 به ارتفاع h_2 میشود. یعنی

$$\frac{p_1 - p_2}{\varrho} = g (h_2 - h_1)$$

ولی بموجب قانون بویل ـ ماریوت چگالی گاز با فشار آن متناسب است. بنابراین

$$\frac{p_1 - p_2}{\varrho} = g\,(h_2 - h_1)$$

طرف چپ، نسبت افزایش فشار در نتیجهٔ افت ارتفاع از h_2 به h_1 است. یعنی برای مقادیر واحد افت ارتفاع $h_2 - h_1$ افزایش فشار به نسبت واحدیست.

نتایج اندازه گیریها و محاسبه با توافق کامل نشان میدهند که در هر یک کیلومتر بالارفتن از سطح دریا، فشار باندازه ۰٫۱ کم میشود. همینطور هم هنگام پائین رفتن از سطح دریا به اعماق معادن ـ ـ در ازاء هریک کیلومتر پائین رفتن، فشار باندازهٔ ۰٫۱ مقدارش اضافه میشود.

بطوریکه گفته شد، فشار باندازه یک دهم مقدارش در ارتفاع قبلی تغییر مییابد. یعنی اگر یک کیلومتر از سطح دریا بالا رویم فشار هوا ۰٫۹ فشار در سطح دریا خواهد شد، و اگر یک کیلومتر دیگر هم بالا رویم فشار برابر ۰٫۹×۰٫۹ فشار در سطح دریا خواهد شد، و در ارتفاع ۳ کیلو متر از سطح دریا فشار مساوی ۰٫۹×۰٫۹×۰٫۹ یعنی $(۰٫۹)^۳$ فشار در سطح دریا خواهد بود. در ارتفاعهای بالاتر نیز همین نسبت صادق است.

اگر فشار در سطح دریا را p_0 بگیریم، فشار در ارتفاع h (به کیلومتر) عبارت خواهد بود از:

$$p = p_0\,(۰٫۸۷)^h = p_0 \times ۱۰^{-۰٫۰۶h}$$

درون پرانتز رقم دقیق‌تر نوشته شده. ۰٫۹ رقم گرد شده آنست. در فرمول بالا گرما در کلیه ارتفاعها یکسان در نظر گرفته شده است. در صورتیکه گرمای‌جو با تغییر ارتفاع تغییر میکند و این تغییر بموجب قانون نسبتا مرکبی صورت میگیرد. ولی با همه اینها فرمول بالا نتایج خوبی بدست میدهد، و در ارتفاعهای تا صد کیلومتر میتوان آنرا مورد استفاده قرار داد.

با این ترتیب به آسانی معلوم میشود که در ارتفاعات البرز ـ

قریب ۵۶۰۰ متر فشار هوا تقریبا نصف میشود، و در ارتفاع ۲۲ کیلومتر (ارتفاع رکوردی صعود بالون هوائی ماوراء جو با سرنشینانش) فشار هوا تا ۵۰ میلیمتر ستون جیوه کاهش مییابد.

وقتی ما از فشار ۷۶۰ میلیمتر ستون جیوه بعنوان فشار عادی صحبت میکنیم، نباید فراموش کنیم، که عبارت «در سطح دریا» باید حتما به آن اضافه شود. چون در ارتفاع مثلاً ۵۶۰۰ متر فشار عادی دیگر ۳۸۰ میلیمتر ستون جیوه خواهد بود، نه ۷۶۰ میلیمتر.

با افزایش ارتفاع، ضمن کاهش فشار، تراکم هوا نیز بر طبق همین قانون کاهش مییابد. در ارتفاع ۱۶۰ کیلومتر هوا خیلی کم و رقیق میشود، چون

$$(۰,۸۷)^{۱۶۰} = ۱۰^{-۱۰}$$

در سطح زمین تراکم هوا تقریبا برابر ۱۰۰۰ گرم در یک‌متر مکعب است. بنابراین بموجب فرمول ما، در ارتفاع ۱۶۰ کیلومتر در یک متر مکعب باید $۱۰^{-۷}$ گرم هوا باشد. در صورتیکه اندازه‌گیریهای انجام شده بوسیله موشکها نشان میدهد که تراکم هوا در این ارتفاع ۱۰ بار بیشتر است.

در ارتفاعهای چندین صد کیلو متر فرمول ما تفاوت کاهشی بیشتری نسبت به آنچه که در واقع وجود دارد نشان میدهد، و بنابر این فرمول غیرقابل استفاده میشود. دلیل این امر تغییر گرما برحسب ارتفاع و هم‌چنین پدیده ویژه‌ی تلاشی ملکولهای هوا زیر تاثیر تشعشع خورشید است. در این‌جا ما به توضیح این مطالب نمی پردازیم.

خلاء

ظرفی که بمفهوم فنی خالی است، هنوز دارای تعداد زیادی ملکول می‌باشد.

ملکولهای گاز برای بسیاری از آلات ووسایل فیزیکی موانع جدی هستند. لامپهای رادیو، لوله‌های رنتگن، شتاب دهنده‌های ذرات ابتدائی – همه این وسایل به خلاء، یعنی به فضای آزاد از ملکولهای

گاز نیاز دارند. درون لامپ چراغ برق معمولی هم باید خلاً باشد. اگر هوا به درون لامپ نفوذ کند، رشته لامپ اکسیده میشود و فوری میسوزد.

در بهترین وسایل خلا، میزان خلاً حدرد ۱۰-۸ میلیمتر ستون جیوه است.

بنظر میرسد که فشار بسیار کمی است. این مقدار تغییر فشار ستون جیوه فشارسنج را به قدر صد میلیونیم میلیمتر حرکت میدهد.

ولی حتی در یک چنین فشار ناچیز، دریک سانتیمتر مکعب باز هم صدها میلیون ملکول هست.

مقایسه این خلاً با خلاً فضای بین ستارگان بسیار جالبست. در آنجا در فضای چند سانتیمتر مکعب بطور متوسط یک ذره ابتدائی ماده وجود دارد.

برای بدست آوردن خلاً از تلمبه های مخصوص استفاده میشود. تلمبه معمولی که گاز را با حرکت پیستون خارج میکند، میتواند خلائی حداکثر تا ۰٫۰۱ میلیمتر ستون جیوه ایجاد کند. یک خلاً خوب یا باصطلاح خلاً عالی را میتوان بوسیله تلمبه‌های دیفوزیونی — جیوه‌ای یا روغنی، که در آنها ملکولهای گاز با جریان شدید بخار جیوه یا روغن گرفته میشوند بدست آورد.

تلمبه‌های جیوه‌ای که بنام سازنده شان لنگمور نامیده میشوند، فقط بعد از تخلیه مقدماتی تا فشار قریب ۰٫۱ میلیمتر ستون جیوه، شروع بکار میکنند. این درجه رقت مقدماتی را فورواکوئوم می‌نامند.

اصل عمل از اینقرار است: حجم کوچک شیشه‌ای به ظرفی محتوی جیوه و فضائی که هوای آن باید کشیده شود و تلمبه فورواکوئوم وصل میشود. جیوه گرم میشود و تلمبه فورواکوئوم بخارهای آن را میکشد. بخارهای جیوه ضمن راه ملکول‌های گاز را با خود میبرند و آن‌ها را به تلمبه فورواکوئوم میرسانند. اتم‌های جیوه بصورت مایع متراکم میشوند (بوسیله تبرید با جریان آب) و جیوه مایع به ظرفی که حرکت جیوه از آنجا آغاز شده بود جاری میگردد.

خلائی که باین طریق در شرایط آزمایشگاهی بدست میآید به هیچ وجه خلاً کامل به معنای مطلق کلمه نیست. خلاً گاز فوق‌العاده رقیق است. خواص آن ممکنست از خواص گاز معمولی بکلی متفاوت باشد.

وقتی میدان جولان یک ملکول از ابعاد ظرفیکه در آن قرار دارد بیشتر باشد، حرکت ملکول‌های «تشکیل دهنده خلاء» تغییر خصلت میدهد. یعنی ملکول‌ها بندرت به همدیگر برخورد میکنند و حرکت‌شان بصورت خطوط مستقیم زیگ‌زاگ انجام میگیرد که گاه به یک‌دیواره و گاه به دیواره دیگر ظرف بر میخورند.

محاسبه کنیم که این حرکت درچه فشاری صورت میگیرد. ما در بالا گفتیم که در هوای با فشار معمولی جو طول میدان حرکت برابر است با 5×10^{-6} سانتیمتر. اگر آن را 10^{7} بار زیاد کنیم مساوی ۵۰ سانتیمتر خواهد شد، یعنی بیشتر از میانگین ابعاد ظرف. چون طول میدان حرکت با چگالی گاز و بنابراین با فشار آن نسبت معکوس دارد، پس فشار آن باید 10^{-7} فشارجو یا تقریبا 10^{-4} میلیمتر ستون جیوه باشد.

حتی فضای بین کرات سماوی نیز خلاء کامل نیست. ولی چگالی ماده در آن حدود 5×10^{-24} g/cm^3 میباشد. ماده اصلی فضای بین‌کرات هیدرژن اتمی است. در حال حاضر چنین حساب کرده‌اند که در هر سانتیمتر مکعب فضای کیهانی چند اتم هیدرژن وجود دارد. اگر ملکول هیدرژن را بقدر یک‌نخود بزرگ کنیم و این «ملکول» را در مسکو قرار دهیم، «همسایه کیهانی» مجاور آن در شهر تولا قرار خواهد گرفت.

کریستال‌ها

بسیاری اشخاص تصور میکنند که کریستال‌ها سنگ‌هائی زیبا و کمیابند.

کریستال‌ها به رنگ‌های مختلف هستند، معمولاً شفافند و چیزیکه بویژه در آن‌ها جلب نظر میکند اینست که دارای اشکال هندسی زیبا و صحیحی میباشند. غالبا کریستال‌ها به اشکال کثیرالسطوح هستند که سطوح آن‌ها خیلی صاف و خطوط تقاطع‌شان کاملاً مستقیم است. چشم انسان از مشاهده اشکال هندسی کریستال‌ها که بطرز شگفتی‌آوری صحیح و منظم میباشند، و از رنگ برنگ شدن سطوح جنبی آن‌ها لذت میبرد.

در میان آنها میتوان از کریستال‌های ساده نمک سنگی یا کلرورسدیم طبیعی که همان نمک‌طعام معمولی است نام‌برد.
کریستال‌های نمک در طبیعت به اشکال متوازی‌السطوح یا مکعب مشاهده میشوند. کریستال‌های کلسیت (کربنات کلسیم طبیعی) دارای شکل ساده متوازی‌السطوح شفاف با زوایای حاده‌اند.
کریستال‌های کوارتز (درکوهی) اشکال مرکب‌تری دارند. هر کریستال کوچک دارای بسیاری سطوح به اشکال گوناگون میباشد که در خطوطی با درازای مختلف همدیگر را قطع میکنند.
بطوریکه ملاحظه میکنید، کریستال‌ها پدیده‌های نادر نیستند، بلکه در واقع ما را احاطه کرده‌اند.
اجسام سختی که ما از آنها خانه میسازیم یا دستگاه‌های ماشینی درست میکنیم، موادی که ما به مصارف معیشتی میرسانیم، تقریبا همه‌شان داخل در جرگه کریستال‌ها میباشند. پس چرا ما آن‌ها را نمی‌بینیم؟ برای اینکه در طبیعت به اجسامی بصورت کریستال‌های منفرد و مجزا (یا باصطلاح اجسام یک کریستالی) خیلی بندرت برخورد میشود. غالبا مواد طبیعت بصورت دانه‌های متبلور بسیار ریز (به ابعاد کوچکتر از یک هزارم میلیمتر) که محکم بهم چسبیده و پیوسته‌اند وجود دارند، و چنین ساختاری را فقط زیر میکروسکپ میتوان دید.
اجسامیراکه از دانه‌های متبلور تشکیل یافته‌اند اجسام ریزبلور یا پلی‌کریستال (پلی به یونانی به معنای «زیاد» است) مینامند.
البته اجسام ریزبلور را نیز باید در شمار کریستال‌ها آورد.
باین ترتیب تقریبا همه اجسام سختی که ما را احاطه کرده‌اند کریستال‌اند. شن و سنگ‌خارا و مس و آهن و سالول که در داروخانه‌ها بفروش میرسد و رنگ‌ها همه کریستالند.
ولی اجسامی هم هستند مثل شیشه و انواع پلاسماسها که از دانه‌های متبلور تشکیل نمی یابند. این اجسام سخت را آمورف یا بیشکل می‌نامند.
بنابراین مطالعه کریستال‌ها به معنای مطالعه تقریبا همه اجسام دور و بر ماست و از اینجا میتوان به اهمیت موضوع پی برد.
کریستال‌های منفرد و مجزا را میشود بلا فاصله از روی شکل هندسی صحیح و منظمشان شناخت.

سطوح صاف با خطوط تقاطع مستقیم خاصیت مشخصه کریستال است، صحت شکل خارجی کریستال بدون شک معلول صحت ترکیب درونی آنست. اگر سطح خارجی کریستال در جهتی کشیده شده باشد، معلوم میشود که کریستال در آن جهت دارای ترکیب درونی ویژه ایست.

ولی فرض کنید که در دستگاهی از یک تکه بزرگ کریستال کره‌ای درست شده باشد. اگر این کره را در دست بگیریم، آیا میتوانیم بفهمیم که کریستالی در دست ماست، و آیا آنرا از یک کره شیشه‌ای تمیز خواهیم داد؟ شکل طبیعی کریستال نشان میدهد که کریستال در جهات مختلف متفاوتست. مادام که این تفاوت در مورد شکل تظاهر میکند، پس باید در مورد دیگر خواص جسم نیز وجود داشته باشد.

استحکام کریستال، خواص الکتریکی، قابلیت انتقال گرما — خلاصه کلیه خواص آن در جهات مختلف متفاوت خواهد بود. این خصوصیت کریستال آنیزوتروپی یا ناهمسانی خوانده میشود.

جسم ناهمسان جسمی است که در جهات مختلف ناهمسان یا متفاوتست.

کریستال‌ها همیشه آنیزوتروپ یا ناهمسانند، در صورتیکه اجسام آمورف، مایعات و گازها ایزوتروپ یا همسانند، یعنی در جهات مختلف (بزبان یونانی «تروپوس» یعنی جهت) دارای خواص واحدی («ایزو» بمعنی همسانی و برابری است) میباشند.

ترکیب کریستال‌ها

چرا شکل کریستال این طور زیبا و صحیح است؟ سطوح خارجی آن چنان شفاف و صاف و هموار است که گوئی استاد صیقل‌کار ماهری روی آن‌ها کار کرده و آن‌ها را باین صورت ساخته و پرداخته است.

قسمت‌های مختلف یک کریستال شبیه و نظیر یکدیگراند که مجموعا شکل متقارن زیبائی را تشکیل میدهند.

16—1500

پاسخ پرسش بالا فقط یک چیز میتواند باشد و آن اینست که بگوئیم: زیبائی ظاهری مسلما پاسخگوی صحت درونی است.

این صحت عبارتست از تکرار مکرر قسمت‌های اساسی واحد.

طارمی پارکی را تصور کنید که از ترکه‌های چوبی با درازای مختلف که بدون هیچ نظم و ترتیبی پهلوی هم چیده شده‌اند، درست شده باشد. معلومست که منظره ناجوری خواهد داشت.

یک طارمی خوب از چوب‌های یک‌دست و یک‌اندازه تشکیل میشود که بصورت صحیح و منظم با فواصل مساوی از هم قرار گیرند.

یک چنین منظره مکرر را ما در کاغذهای دیواری که به دیوار اطاق چسبانده شده است نیز میبینیم. در اینجا یکی از تصاویر روی کاغذ دیواری مثلا دختربچه‌ای که با توپ بازی میکند تکرار میشود، ولی نه در یک جهت مثل طارمی پارک، بلکه در جهات مختلف بطوریکه صفحه کاغذ دیواری را پر میکند.

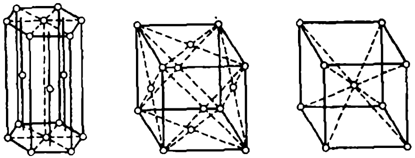
چه رابطه و مناسبتی بین طارمی و کاغذ دیواری با کریستال وجود دارد؟

رابطه کاملاً مستقیم وجود دارد. چون طارمی پارک از اجزاء و عناصری تشکیل میابد که در طول خطی تکرار میشوند، کاغذ دیواری نیز از تصاویری تشکیل میابد که در طول صفحه‌ای تکرار میشوند، کریستال نیز از گروههای اتمهائی تشکیل میابد که در فضا تکرار میشوند، بهمین جهت است که میگویند اتمهای کریستال طارمی فضائی (یا بلوری) تشکیل میدهند.

در حال حاضر ترکیب صدها کریستال برما معلوم است. حالا ما از ترکیب ساده‌ترین کریستالها و در نوبه اول از کریستالهائی که از اتمهای یک‌جنس ترکیب یافته‌اند، صحبت میکنیم.

سه شبکه‌ای که بیشتر مشاهده میشوند در شکل ۸۹ نشان داده شده‌اند. نقطه‌ها نمایشگر مراکز اتمها هستند. خطوطی که نقطه‌ها را بهم وصل میکنند، فاقد مفهوم واقعی میباشند و فقط برای این کشیده شده‌اند که وضع استقرار اتمها در فضا برای خواننده روشن شود.

اشکال آ، ۸۹ و ب,۸۹ شبکه های مکعبی شکل را نشان میدهند.



پ　　　ب　　　آ

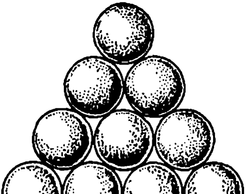
شکل ۸۹

برای داشتن تصور روشنتری از این شبکه‌ها فرض کنید که اشکال مکعبی شکل بازیچه کودکان را به ساده ترین طرزی (خطوط بر خطوط، سطوح بر سطوح) پهلوی‌هم چیده‌اید.

حال اگر در ذهنتان نقاط رؤس و مراکز احجام مکعبها را در نظر بگیرید، شبکه مکعبی مجسم در شکل سمت راست بدست میاید. این ساختار را ساختار مکعبی با تمرکز احجام نامند. و اگر نقاط رؤس مکعبها و مراکز سطوح آنها را در نظر بگیریم، آنوقت شبکه مکعبی مجسم در شکل میانی بدست خواهد آمد که آنرا ساختار مکعبی با تمرکز سطوح خوانند.

شبکه سوم (شکل پ,۸۹) شبکه متراکم هگزاگونال (شش پهلو) نامیده میشود.

برای فهم منشاء این اصطلاح و داشتن تصور روشنتری از وضع استقرار اتم‌ها در این شبکه گوی‌های بازی بیلیارد را برمیداریم و سعی میکنیم آنها را هرچه فشرده‌تر پهلوی هم قرار دهیم. ابتدا یک قشر متراکم درست میکنیم ـ شکل آن مثل گویهای بیلیاردی که قبل از شروع بازی در «مثلث چوبی» جمع میکنند خواهد بود (شکل ۹۰). ملاحظه میشود که گوی درونی



شکل ۹۰

مثلث دارای شش نقطه تماس با گویهای مجاورش میباشد و این شش گوی مجاور گوی مرکزی تشکیل یک شش گوش را میدهند. به چیدن گویها پهلوی‌هم بطوریکه گفته شد ادامه میدهیم، منتها این بار قشر دوم را روی قشر اول می‌چینیم. اگر گویهای قشر بالائی را مستقیماً روی گویهای قشرپائینی قرار دهیم، مجموعه حاصله متراکم نخواهد بود. اگر بخواهیم در حجم معین تعداد حتی الامکان بیشتری گوی قرار دهیم، باید گویهای قشر دوم را در حفره‌های قشراول و گویهای قشر سوم را در حفره‌های قشر دوم قرار دهیم و بهمین ترتیب اقشار بعدی را بچینیم. در متراکم‌ترین مجموعه هگزا گونال (شش گوش) گویهای قشر سوم طوری قرار گرفته اند که مراکزشان بالای مراکز گویهای قشراول قرار دارند.

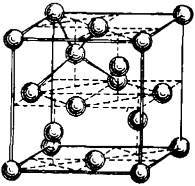
مراکز اتمها در شبکه کاملاً متراکم هگزاگونال درست مثل مراکز گویهایی که در شیوه استقرار متراکم مثال بالا شرح داده شد قرار دارند. تعداد زیادی از عناصر شیمیائی بصورت سه شبکه مشروحه بالا متبلور میشوند:

مجموعه هگزاگونال کاملاً متراکم ...Be, Co, Hf, Ti, Zn, Zr

ساختار مکعبی با تمرکز سطوح ...Al, Cu, Co, Fe, Au, Ge, Ni, Ti

ساختار مکعبی با تمرکز احجام ...Cr, Fe, Li, Mo, Ta, Ti, U, V

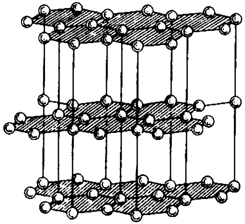
از دیگر ساختارها فقط چندتائی را ذکر میکنیم. در شکل ۹۱ ساختار الماس تصویر شده است. مشخصه این ساختار عبارت از آنست که اتم کربن الماس دارای چهار همسایه نزدیک است. این رقم را با ارقام مربوط به سه ساختار بسیار متداول مشروحه بالا مقایسه کنیم. بطوریکه از اشکال مشاهده میشود، در مجموعه هگزاگونال کاملا متراکم هر اتم ۱۲ همسایه خیلی نزدیک دارد. اتم‌هائی که شبکه مکعبی با تمرکز سطوح تشکیل میدهند نیز دارای همینقدر همسایه میباشند. در شبکه با تمرکز احجام هر اتم دارای ۸ همسایه است.



شکل ۹۱

حالا چند کلمه از گرافیت صحبت

میکنیم که ترکیب آن در شکل ۹۲ نشان داده شده است. ویژگیهای این ساختار بچشم میخورد. گرافیت از اقشار اتمها ترکیب یافته است و ضمنا ارتباط اتم‌های یک قشر بین همدیگر خیلی شدیدتر از اتمهای اقشار مجاور است. و این با مقدار فواصل بین اتمها مربوط است: فاصله بین همسایه‌ها



شکل ۹۲

دریک‌قشر ۲,۵ بار کمتر از کوتاهترین فاصله بین اقشار است.

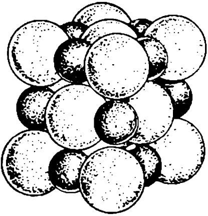
چون اقشار اتمها باهم اتصال محکمی ندارند، کریستالهای گرافیت به آسانی در طول این اقشار خورد میشوند. از این‌رو در مواردی که روغن‌های گریسکاری را نمیشود بکار برد — مثلاً در گرماهای خیلی‌کم و یا خیلی زیاد — میتوان از گرافیت برای روغنکاری استفاده نمود. گرافیت ماده گریسکاری جامد است.

اصطکاک بین دو جسم به اینجا منجر میشود که بر آمدگیهای خیلی ریز و میکروسکپی یک جسم به فرورفتگیهای جسم دیگر میافتند. نیروی لازم برای خورد کردن یک کریستال ریز گرافیت خیلی کمتر از نیروهای اصطکاک است، بنا بر این گریسکاری گرافیتی لغزش یک جسم روی جسم دیگر را خیلی تسهیل میکند.

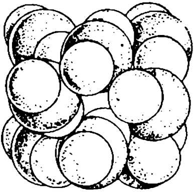
ساختارهای کریستالهای ترکیبات شیمیائی بینهایت گونا گونند. بعنوان نمونه‌های کاملاً متفاوت آنها میتوان مثلاً از ساختارهای نمک‌سنگی و انیدرید کربنیک نام برد که در اشکال ۹۳ و ۹٤ نشان داده شده‌اند.

کریستالهای نمک سنگی (شکل ۹۳) تشکیل میبابند از اتم‌های سدیم (گویهای کوچک تیره) و کلر (گویهای بزرگ روشن) که یک درمیان در طول محورهای مکعب قرار گرفته اند.

هر اتم سدیم دارای شش اتم همسایه از نوع دیگر است که بطرز یکسانی نسبت به آن قرار گرفته‌اند. اتم کلر هم همین وضع را دارد.



شکل ۹۳



شکل ۹٤

پس ملکول کلرور سدیم کجاست؟ چنین ملکولی نیست. درکریستال نه فقط مجموعه‌ای از یک اتم سدیم و یک اتم کلر وجود ندارد بلکه بطور کلی هیچ مجموعه‌ای از اتمها با نزدیک هم قرار گرفتنشان در میان دیگر اتمها تمیز داده نمیشوند.

فرمول شیمیائی NaCl دلیل آن نیست که ما بگوئیم: «ماده مزبور از ملکولهای NaCl تشکیل یافته است». فرمول شیمیائی فقط اینرا میرساند که ماده از تعداد برابر اتمهای سدیم و کلر تشکیل یافته است.

مساله وجود ملکولها در ماده به ساختار ماده مربوط است. اگر در ساختاری مجموعه اتمهای نزدیک بهم تمیز داده نشوند، در آنجا ملکول نیست.

کریستالهای بدون ملکول را کریستالهای اتمی گویند.

گرما

گرماسنج

اگر دو جسم را که به درجات مختلف گرم شده‌اند بهم بچسبانیم، آنکه گرمتر است سرد میشود و گرمای جسم دیگر بالا میرود. در مورد این دو جسم میگویند که بین آنها مبادله گرما صورت میگیرد. البته معمولاً ما هیچوقت در موردی که مثلاً شخصی صد روبل به شخص دیگری میدهد و آن شخص آنرا میگیرد اصطلاح مبادله را بکار نمیبریم. ولی در فیزیک این اصطلاح پذیرفته شده است.

بطوریکه گفته شد، مبادله گرما بمنزله نوعی انتقال انرژی است. ما آن جسمی را گرمتر مینامیم که انرژی دفع میکند. اگر ما به جسمی دست بزنیم، موقعی احساس گرم بودن آن را میکنیم که جسم دست ما را گرم کند، یعنی به دست ما انرژی منتقل کند. و برعکس، اگر احساس سرما بکنیم معلوم میشود که جسم از بدن ما گرما میگیرد.

در مورد جسمی که گرمای خود را دفع میکند (یعنی از طریق مبادله گرما انرژی دفع میکند)، میگوئیم: گرمای آن بیش از گرمای جسمی است که آن گرمای دفع شده را بخود میگیرد.

ما بامشاهده اینکه جسم مورد نظرما در تماس با جسم دیگر گرم یا سرد میشود، میتوانیم «جای» آن را در ردیف اجسام گرم شده بیابیم. بنابراین گرما نشانه ایست نمایشگر اینکه جسم مورد نظرما برای چه اجسامی نقش بخشنده را ایفا میکند و برای چه اجسامی نقش گیرنده‌را.

گرما را بوسیله گرماسنج اندازه میگیرند.

ساختمان گرماسنج بر پایه استفاده از خواص گوناگون اجسامی که در برابر گرما حساسیت دارند مبتنی است. در بیشتر موارد از خاصیت انبساط اجسام در اثر افزایش گرما استفاده میشود.

اگر جسم گرماسنج ضمن تماس با اجسام گوناگون تغییر حجم دهد، معلوم میشود که آن اجسام دارای گرماهای متفاوت میباشند. وقتی حجم جسم گرماسنج بیشتر باشد، درجه‌گرما زیادتر است، و وقتی حجم کمتر است، درجه گرما پائینتر است.

همه اجسام میتوانند بعنوان گرماسنج بکار روند: هم مایعات مثل جیوه یا الکل، هم جامدات، مانند انواع فلزات، و هم مواد گازی شکل. ولی قابلیت انبساط اجسام مختلف در مقابل گرما متفاوتست و بنابراین درجه‌بندی گرماسنجهای جیوه‌ای و الکلی و گازی با هم مطابقت نخواهد داشت. البته در کلیه گرماسنجها همیشه میتوان دو نقطه اصلی مربوط به گرماهای آب شدن یخ و جوش آمدن آب را مشخص کرد، بنابراین درجات صفر و ۱۰۰ سانتیگراد را همه گرماسنجها همیشه یکسان نشان میدهند. ولی در گرماهای بین صفر و ۱۰۰ انبساط اجسام متفاوت خواهد بود. یک جسم بین درجات صفر و ۵۰ گرماسنج جیوه‌ای بسرعت منبسط میشود و در درجات ۵۰ تا ۱۰۰ بکندی، و جسم دیگر برخلاف آن — در درجات صفر تا ۵۰ بکندی و در درجات ۵۰ تا ۱۰۰ بسرعت انبساط مییابد.

اگر ما گرماسنجهائی با اجسام دارای قابلیت انبساط مختلف داشته باشیم، به اختلافات چشمگیری در نتایج اندازه‌گیریهای آنها برخورد میکنیم، هرچند این نتایج در نقاط اصلی باهم مطابقت دارند. بعلاوه، اگر ما گرماسنج آبی میداشتیم به چنین نتیجه‌ای میرسیدیم که اگر جسمی را که تا صفر درجه سرد شده است روی اجاق برقی بگذاریم، «گرمای‌آبی» آن ابتدا کاهش مییابد و بعد بالا میرود. این بدانجهت است که آب بهنگام گرمایش، ابتدا از حجمش کاسته میشود و بعد حالت «عادی» بخود میگیرد، یعنی حجم آن در نتیجه گرمایش زیاد میشود.

باین ترتیب ملاحظه میشود که برگزینی نسنجیده ماده گرماسنج میتواند اشکالات بزرگی برای ما بوجود آورد

حال ببینیم که در برگزینی گرما سنج «صحیح» چه عاملی را باید ملاک قرار داد؟ چه جسمی برای این کار ایده‌آل محسوب میشود؟

ما در مورد اینگونه اجسام ایده‌آل صحبت کردیم. آنها گازهای ایده‌آلند. در گاز ایده‌آل تاثیر متقابل ذرات وجود ندارد و هنگام

بررسی انبساط گاز ایده‌آل ما چگونگی تغییر حرکت ملکولهای آنرا بررسی میکنیم. و همانا به این جهت نیز گاز ایده‌آل ماده‌ی ایده‌آلی برای تهیه گرماسنج میباشد.

در واقع نیز این خاصیت بلافاصله بچشم میخورد که در حالیکه آب بگونه‌ای متفاوت از الکل و الکل متفاوت از شیشه و شیشه متفاوت از آهن انبساط میبابند، هیدرژن و اکسیژن و ازت و با هر گاز دیگر در حالت رقت لازم و شایسته‌ی نام ایده‌آل، درحین گرمایش بطرز دقیقا یکسانی منبسط میشوند.

بدینسان پایه و اساس تعیین گرما در فیزیک را تغییر حجم کمیت معین گاز ایده‌آل تشکیل میدهد. بدیهیست، بعلت اینکه گازها دارای قابلیت شدید تراکم میباشند، باید بویژه باین نکته دقیقا توجه داشت که گاز باید زیر فشار ثابت قرار داشته باشد.

برای مدرج کردن گرماسنج گازی باید حجم گاز را در گرماهای صفردرجه و ۱۰۰ درجه با دقت اندازه بگیریم. تفاوت حجم‌های $V_{۱۰۰}$ و $V_۰$ را به ۱۰۰ قسمت مساوی تقسیم میکنیم. باین ترتیب، تغییر حجم گاز بقدر $\frac{۱}{۱۰۰}\times(V_{۱۰۰}-V_۰)$ با یک درجه سانتیگراد (۱°C) مطابقت دارد.

حال فرض کنیم که گرماسنج ما حجم V را نشان میدهد. این حجم با چه میزان گرمائی $t°C$ تطبیق میکند؟ یافتن این درجه گرما بسهولت ممکن است:

$$t°\mathrm{C}=\frac{V-V_۰}{V_{۱۰۰}-V_۰}\times ۱۰۰$$

یعنی:

$$\frac{t°\mathrm{C}}{۱۰۰}=\frac{V-V_۰}{V_{۱۰۰}-V_۰}$$

بکمک این برابری، هر حجم V مربوط میشود به حرارت معینی t و باین ترتیب، آن مقیاس* حرارتی که فیزیکدانان آنرا مورد استفاده قرار میدهند بدست میآید.

---

*مقیاس سانتیگراد که در آن گرمای یخ درحال ذوب صفردرجه سانتیگراد C و گرمای جوشش آب (هر دو در شرایط فشارعادی

با افزایش گرما حجم گاز بطور نامحدودی زیاد میشود. ضمنا برای افزایش گرما هیچ حد تئوریکی وجود ندارد. برعکس، گرماهای پائین (درجات منفی در مقیاس سانتیگراد) دارای حد میباشند.

واقعا ببینیم در درجات گرمای خیلی پائین چه روی میدهد؟ گاز حقیقی سر انجام به مایع مبدل میشود، و در درجات بازهم پائینتر سخت و جامد میشود. ملکولهای گاز در این حالت در حجم خیلی کوچکی گرد میآیند. در گرما سنج ما که از گاز ایده‌آل پر شده است. این حجم برابر چیست؟ ملکول‌های آن روی همدیگر تاثیر نمیکنند و حجم هم ندارند. بنابر این، پائین آمدن گرما گاز ایده‌آل را به حجم صفر میرساند. نزدیک شدن به حدی که عملاً نزدیکترین حد ممکن به حالت مشخص گاز ایده‌آل است — و در مورد مفروض، به

---

۷۰۶ میلیمتر ستون جیوه) ۱۰۰ درجه سانتیگراد C قبول شده است، مقیاس بسیار مناسبی است. ولی انگلیسیها و آمریکائیها تا کنون مقیاس گرمائی بکار میبرند که بنظر ما خیلی عجیب میرسد. مثلاً لابد شما هم وقتی که در یک رمان انگلیسی بخوانید: «تابستان گرمی نبود، گرمای‌هوا ۷۰ — ۶۰ درجه بود» تعجب خواهید کرد، یعنی چه؟ درچاپ کتاب اشتباه شده؟ خیر. نویسنده درجه گرما را به مقیاس فارنهایت (F°) نشان داده است.

در انگلستان درجه گرمای هوا بندرت از ۲۰ درجه سانتیگراد زیر صفر پائینتر میافتد. فارنهایت مخلوط یخ ونمک را که تقریبا دارای چنین درجه حرارتی است برگزید و گرمای آن را صفر گرفت.

در این مقیاس برای گرمای ۱۰۰°، بگفته فارنهایت، گرمای عادی بدن انسان قبول شد. ولی او برای تعیین این نقطه، مثل اینکه انسانی را انتخاب کرده بود که کمی تب داشت. در مقیاس فارنهایت گرمای عادی متوسط بدن انسان مطابق با $۹۸^\circ F$ است. در این مقیاس آب در $۳۲^\circ F$ + یخ میبندد و در $۲۱۲^\circ F$ می‌جوشد.

فرمول تبدیل این دو مقیاس چنین است:

$$t^\circ \mathrm{C} = \frac{۵}{۹}(t - ۳۲)^\circ \mathrm{F}.$$

حد حجم صفر – کاملاً امکان پذیر است. برای این کار باید گرما‌سنج گازی را از گاز حتی المقدور رقیق پر کرد. بنا بر این ما کاری خلاف واقعیت نکرده‌ایم اگر حجم فوق العاده ناچیز گاز را مساوی صفر بگیریم.

بموجب فرمول ما، حجم برابر صفر مربوط به حداقل گرمای ممکن میباشد. این گرما صفر مطلق گرما نام دارد.

برای تعیین وضع صفر مطلق در مقیاس سانتیگراد باید در فرمول گرما که بدست آوردیم، بجای حجم V صفر بگذاریم: $V_{\cdot} = \cdot$ در اینصورت گرمای صفر مطلق برابر خواهد شد با:

$$-\frac{V_{\cdot} \times 100}{V_{100} - V_{\cdot}}$$

از قرار معلوم، این نقطه جالب با گرمای تقریبا -273° (رقم دقیق آن $-273{,}15^{\circ}$ است) مطابق است.

از اینجا معلوم میشود که گرمائی پائینتر از صفر مطلق وجود ندارد، چون در اینصورت حجم گاز میبایستی منفی میشد. بنابراین صحبت از گرماهای زیر صفر مطلق بیمعنی است. بدست آوردن گرماهای زیر صفر مطلق همانقدر غیر ممکن است که مثلاً تهیه سیمی بقطر کمتر از صفر.

در صفر مطلق جسم را نمیتوان سرد کرد، یعنی نمیشود از جسم انرژی ستاند. بدیگر سخن، در شرایط صفر مطلق اجسام و ذراتی که آن اجسام از آنها ترکیب یافته اند، دارای حد اقل انرژی ممکن میباشند. این بدانمعنی است که در صفر مطلق انرژی سینتیک برابر صفر است و انرژی پتانسیل دارای حداقل مقدار ممکن میباشد.

از آنجا که صفر مطلق نازلترین گرمای ممکن است، بنابر این طبیعی است که در فیزیک، بویژه دربخشهائی از آن که با گرماهای خیلی پائین سرو کار دارند، مقیاس مطلق حرارت را بکار میبرند. کاملاً روشن است که گرمائی که با این مقیاس اندازه گیری شود با اندازه همان گرما بمقیاس سانتیگراد 273° تفاوت دارد، یعنی $T_{\text{مطلق}} = (t + 273)^{\circ}\text{C}$ مثلاً گرمای اطاق در مقیاس مطلق حدود رقم 300 را نشان خواهد داد. مقیاس مطلق گرما ها را مقیاس کلوین نیز مینامند (بنام دانشمند مشهور انگلستان در سده نوزدهم)، و بجای $T_{\text{مطلق}}$ مینویسند: $T^{\circ}\text{K}$.

فرمول تعیین گرمای T در گرماسنج گازی، برای گرمای مطلق به این صورت میتواند نوشته شود:

$$T = ۱۰۰ \times \frac{V - V_۰}{V_{۱۰۰} - V_۰} + ۲۷۳$$

با استفاده از برابری $\frac{۱۰۰ V_۰}{V_{۱۰۰} - V_۰} = ۲۷۳$ به این نتیجه ساده میرسیم:

$$\frac{T}{۲۷۳} = \frac{V}{V_۰}$$

باین ترتیب، گرمای مطلق با حجم گاز ایده‌آل نسبت مستقیم دارد. اندازه‌گیریهای دقیق گرما فیزیکدانان را وادار میکند که به انواع حیله دست بزنند. در فاصله نسبتا وسیع گرماها گرماسنجهای جیوه‌ای، الکلی (برای مناطق قطبی) و دیگر گرماسنجها از روی گرماسنج گازی مدرج میشوند. ولی گرماسنج گازی هم در گرماهای خیلی نزدیک به صفر مطلق (زیر $۰,۷ \ ^\circ K$)، که همه گازها مایع میشوند، و هم چنین در گرماهای بیش از $۶۰۰ ^\circ C$، که گازها حتی از شیشه هم نفوذ میکنند، بکار نمیآید. برای گرماهای خیلی زیاد و خیلی کم اصول دیگری برای اندازه‌گیری گرماها بکار برده میشود.

شیوه‌های عملی اندازه‌گیری گرما متعدد است. وسایل مبتنی بر پدیده‌های برقی خیلی با اهمیتند. اکنون فقط یک نکته مهم را باید بخاطر داشت و آن اینست که در هر گونه اندازه‌گیری گرما ما باید اطمینان حاصل کنیم که مقدار اندازه گیریهای ما با آنچه که در صورت استفاده از گرماسنج گازی از انبساط گاز رقیق بدست میآید کاملاً مطابقت داشته باشد.

گرماهای خیلی زیاد در کوره‌ها بوجود میآیند. در کوره‌های قنادی گرما به ۲۲۰ تا $۲۸۰ ^\circ C$ میرسد. در متالورژی گرماهای زیادتری بکار میرود. از جمله مثلاً کوره‌های سخت کاری ۹۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه و کوره‌های آهنگری ۱۴۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه گرما میدهند. در کوره‌های ذوب فولاد گرما به ۲۰۰۰ درجه میرسد.

با کمک قوسهای الکتریکی گرماهای کوره‌ای فوق العاده زیاد

(قریب ۵۰۰۰ درجه) بدست میآورند. شعله قوس دیر گدازترین فلزات را «وادار به تسلیم میکند».

پس گرمای شعله‌های اجاق گازی چقدر است؟ گرمای مخروط آبی رنگ درونی شعله از $300°$ بیشتر نیست. و در مخروط برونی گرما به ۱۸۰۰ درجه میرسد.

بهنگام ایفجار اتمی گرماهای فوق‌العاده‌ای پدید میآیند. بموجب ارزیابیهائی که بطور غیرمستقیم بعمل آمده‌اند، گرما درمرکز انفجار به چندین میلیون درجه میرسد.

در این اواخر تلاشهائی بخاطر بدست آوردن دماهای فوق‌ـ العاده زیاد در تاسیسات آزمایشگاهی (اگرا، زتا) که در اتحاد شوروی و در خارج احداث میگردند، بعمل میآید. در این تاسیسات امکان بدست آوردن گرماهای فوق العاده زیاد، تا دو میلیون درجه، حاصل شده است.

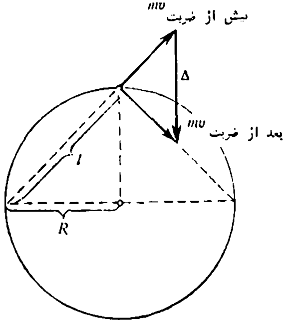
در طبیعت دماهای فوق‌العاده زیاد وجود دارند، اما نه در زمین، بلکه در دیگر اجرام کاینات. در مراکز ستارگان، از جمله خورشید، گرما به دهها میلیون درجه میرسد.

ولی قسمت‌های سطحی ستارگان گرمای خیلی کمتری دارند که از حدود $20000°$ تجاوز نمیکند. گرمای سطح خورشید ۶۰۰۰ درجه است.

تئوری گاز ایده‌آل

خواص گاز ایده‌آل که تعیین میزان گرما را برای ما میسر میسازد خیلی ساده است. درصورتی که گرما ثابت باشد قانون بویل — ماریوت صادق است، بدینمعنی که ضمن تغییر حجم و فشار حاصلضرب pV بدون تغییر میماند. در صورتیکه فشار ثابت باشد، خارج قسمت $\frac{V}{T}$ محفوظ میماند. مثل اینکه حجم و گرما تغییر نکرده اند.

بدیهیست که $\frac{pV}{T}$ خواه در صورتیکه گرما ثابت بماند ولی V و p تغییر کنند، و خواه در حالتی که فشار ثابت باشد ولی V و T تغییر نمایند، مقدار ثابتی باقی خواهدماند. مقدار $\frac{pV}{T}$ نه فقط با تغییر هر زوجی از عوامل سه گانه، بلکه با تغییر هر سه عامل p و V



شکل ۹۵

و T نیز ثابت و بدون تغییر میماند. قانون مقدارثابت $\frac{pV}{T} = \text{const}$ باصطلاح معادله‌ی حالت گاز ایده‌آل را تعیین میکند.

گاز ایده‌آل از آنجهت بعنوان گرماسنج برگزیده شده است که تنها خواص آن فقط با حرکت ملکولها مربوط میباشد (نه با تاثیرات متقابله‌ی آنها).

چه رابطه‌ای بین حرکت ملکولها و گرما وجود دارد؟ برای پاسخ به این پرسش باید رابطه‌ی بین فشارگاز با حرکت ملکولها در آن را بیابیم.

فرض میکنیم ظرف کره‌ای به شعاع R حاوی N ملکول باشد (شکل ۹۵).

حرکت یکی از آن ملکولها، مثلاً ملکولی را که در لحظه‌ی مفروض از چپ به راست در امتداد وتر به درازای l حرکت میکند، زیر نظر میگیریم . به برخوردهای ملکولها توجه نمیکنیم، چون این برخوردها روی فشار تاثیری نمیکنند. ملکول تا آخرین حد جولانگاهش پرواز کرده به جدار ظرف میخورد و با همان سرعت (ضربه‌ی کشسانی) به جهت دیگر منحرف میشود. در وضع ایده‌آل، این حرکت میتوانست برای همیشه درون ظرف ادامه داشته باشد. اگر سرعت ملکول v باشد، در هر $\frac{l}{v}$ ثانیه یک ضربه صورت خواهد گرفت، یعنی در هر ثانیه هر ملکول $\frac{v}{l}$ بار به جدار ظرف خواهد خورد.

رگبار مداوم ضربات N ملکول جمع شده نیروی واحد فشار را بوجود میآورد.

بموجب قانون نیوتن نیرو برابر است با تغییر مقدار حرکت (امپولس) در واحد زمان. تغییر امپولس در هر ضربه را با علامت Δ نشان میدهیم. این تغییر $\frac{v}{l}$ بار در ثانیه انجام میگیرد. پس سهم هر ملکول در ایجاد نیرو $v \times \frac{\Delta}{l}$ خواهد بود.

در شکل ۹۵ بردارهای امپولس‌ها پیش از ضربه و بعد از آن و همچنین بردار افزایش امپولس Δ تصویر شده است. از تشابه مثلثات ترسیمی چنین بر میآید: $\frac{\Delta}{l}=\frac{mv}{R}$. بنابراین سهمی که هر ملکول در ایجاد نیرو دارد باین صورت در خواهد آمد: $\frac{mv^2}{R}$

بطوریکه ملاحظه میشود، درازای وتر در این فرمول نقشی ندارد. از اینجا معلوم میشود که ملکولها روی هر وتری هم که حرکت کنند، سهم یکسانی در ایجاد نیرو خواهند داشت. البته تغییر امپولس در ضربه‌ی مایل کمتر خواهد بود. ولی در عوض، در این حالت شماره ضربات بیشتر است. محاسبه نشان داده است که نتایج تاثیرات در هر دو مورد دقیقا با هم برابر اند.

چون، در ظرف کره‌ای بطوریکه گفته شد، N ملکول هست، پس نیروی مجموع برابر خواهد بود با:

$$\frac{Nmv^2_{\text{متوسط}}}{R}$$

که در آن $v_{\text{متوسط}}$ سرعت میانگین ملکولها است.

فشار گاز p که مساوی خارج قسمت نیرو بر سطح کره $4\pi R^2$ است، برابر خواهد بود با

$$p=\frac{Nmv^2_{\text{متوسط}}}{R\times 4\pi R^2}=\frac{\frac{1}{3}Nmv^2_{\text{متوسط}}}{\frac{4}{3}\pi R^3}=\frac{Nmv^2_{\text{متوسط}}}{3V}$$

که در آن V حجم کره است. با این ترتیب،

$$pV = \frac{1}{3} N m v^2_{\text{متوسط}}$$

خواهد شد.

این معادله را نخستین بار دانیل برنولی* درسال ۱۷۳۸ بدست‌آورد.

از معادلهٔ حالت گاز ایده‌آل این نتیجه بدست آمده بود که

$$pV = \text{const} \times T$$

از معادله‌ی اول دیده میشود که pV با $v^2_{\text{متوسط}}$ نسبت مستقیم دارد. بنابراین $T \backsim v^2_{\text{متوسط}}$ و یا $v_{\text{متوسط}} \backsim \sqrt{T}$ یعنی سرعت ملکول گاز ایده‌آل مستقیماً متناسب است با ریشهٔ درجه‌ی دوم یا جذر گرمای مطلق.

قانون آوگادرو

فرض کنیم ماده، آمیزه‌ای از ملکولهای مختلف باشد. آیا چنان کمیت فیزیکی بیانگر حرکت وجود دارد که برای همه این ملکولها، مثلاً برای هیدرژن و اکسیژن که در گرمای یکسان قرار دارند، یکی باشد؟

مکانیک به این پرسش پاسخ میدهد. میتوان ثابت کرد که کمیت واحد برای همه ملکولها انرژی سینتیک های میانگین حرکت انتقالی $\frac{m v^2_{\text{متوسط}}}{2}$ میباشد.

این بدانمعنی است که در گرمای مفروض و معین مجذورهای میانگین سرعت ملکولها با جرم اجزاء نسبت معکوس دارد:

$$v_{\text{متوسط}} \backsim \frac{1}{\sqrt{m}}$$

---

*دانیل برنولی اصلاً سویسی بود، ولی در روسیه زندگی و کار میکرد و آکادمیسین پطربورگ بود. فعالیت ژان برنولی و یاکوف (ژاک) برنولی نیز مشهور است.

حالا بر گردیم به معادله‌ی $pV=\frac{1}{3}Nmv^2_{متوسط}$ چون در حرارت معین مقادیر $mv^2_{متوسط}$ برای همه گازها یکسان است، پس شماره N ملکولهای محتوی در حجم مفروض در شرایط فشار معین p و گرمای معین T برای کلیه گاز ها یکی است.

این قانون جالب را نخستین‌بار آوگادرو فرموله کرد.

پس شماره‌ی ملکولها در هر سانتیمتر مکعب گاز چقدر است؟ از قرار معلوم، در یک سانتیمتر مکعب گاز در حرارت صفر درجه سانتیگراد و ۷۶۰ میلیمتر ستون جیوه $۲,۷\times۱۰^{۱۹}$ ملکول وجود دارد. رقم خیلی بزرگی است. برای اینکه بتوانید تصوری از عظمت آن داشته باشید، یک مثال میآوریم. فرض کنیم از ظرف کوچک به حجم ۱ سانتیمتر مکعب، گاز با سرعت یک میلیون ملکول در هر ثانیه خارج میشود. به آسانی میشود محاسبه کرد که این ظرف بعد از یک میلیون سال از گاز کاملاً خالی خواهد شد!

قانون آوگادرو نشان میدهد که در فشار و گرمای معین نسبت بین شماره‌ی ملکولها و حجمی که ملکولها در آن قرار دارند، یعنی $\frac{N}{V}$ برای کلیه‌ی گازها مقداریست یکسان.

چون چگالی گاز $\varrho=\frac{N}{V}m$ است و پس نسبت چگالیهای گازها برابر نسبت اوزان ملکولی آنهاست:

$$\frac{\varrho_1}{\varrho_2}=\frac{m_1}{m_2}$$

با ین ترتیب میتوان اوزان نسبی ملکولها را از طریق توزین ساده‌ی مواد گازی شکل بدست آورد. این اندازه‌گیریها زمانی نقش بزرگی در پیشرفت شیمی ایفا کردند و اکنون نیز برای یا فتن وزن ملکولی مواد مرکب تازه مورد استفاده قرار میگیرند.

فقط باید این مواد را بدون اینکه خراب شوند به حالت گازی شکل در آورد. هوا مخلوطی از گازها است، و برای مقایسه‌ی چگالی آن با چگالی دیگر گازها بهتر است وزن ملکولی میانگین هوا را گرفت که از قرار معلوم برابر ۲۸٫۸ میباشد. با دانستن این رقم بآسانی

میتوان چگالی گازها را نسبت به هوا بدست آورد. مثلاً چگالی بخار آب با وزن ملکولی ۱۸ نسبت به هوا $۰,۶۲ = \frac{۱۸}{۲۸,۸}$ است.

سرعتهای ملکولها

تئوری نشان میدهد که در گرمای واحد انرژیهای سینتیک میانگین ملکولها $\frac{mv^۲_{متوسط}}{۲}$ مقادیری یکسانند. در تعریف ما از گرما این انرژی سینتیک میانگین حرکت انتقالی ملکولهای گاز با گرمای مطلق تناسب مستقیم دارد. معادله‌ی این قانون بسیار مهم اینطور نوشته میشود.

$$\left(\frac{mv^۲}{۲}\right)_{متوسط} = ۲,۱ \times ۱۰^{-۱۶} T$$

که در آن انرژی به ارگ اندازه‌گیری میشود.

ما قبلاً دیدیم که گرما نوعی معیار شدت حرکت گرمائی است. ولی حالا ما می بینیم که اندازه‌گیری گرما بوسیله‌ی گرماسنجی که از گاز ایده‌آل پر شده است، به این معیار مفهوم فوق‌العاده ساده‌ای میدهد. گرما با مقدار میانگین انرژی حرکت انتقالی ملکولها متناسب است.

سرعت متوسط ملکولهای اکسیژن را در گرمای معمولی اطاق که ما آنرا برای سهولت عدد صحیح $۲۷^\circ C = ۳۰۰^\circ K$ میگیریم تعیین میکنیم. وزن ملکولی اکسیژن ۳۲ است، و بنابراین وزن یک ملکول برابر $\frac{۳۲}{۶ \times ۱۰^{۲۳}}$ میشود. با یک محاسبه ساده، سرعت متوسط $v_{متوسط} = ۴,۸ \times ۱۰^۴$ cm/sec، یعنی حدود ۵۰۰ متر در ثانیه بدست میآید.

ملکولهای هیدرژن خیلی سریعتر حرکت میکنند. جرم آنها ۱۶ بار کمتر و سرعتشان $\sqrt{۱۶} = ۴$ بار بیشتر است، یعنی در گرمای معمولی اطاق حدود ۲ کیلومتر در ثانیه میباشد.

حالا تخمین بزنیم که ذره ریزی که در میکروسکپ دیده میشود با چه سرعت گرمائی حرکت میکند. میکروسکپ معمولی مشاهده‌ی ذره‌ای بقطر یک میکرون (10^{-4} cm) را امکان پذیر میسازد. جرم چنین ذره ای با چگالی نزدیک به یک تقریبا برابر 5×10^{-13} گرم خواهد بود. و سرعت آن حدود ۰٫۵ cm/sec بدست خواهد آمد. تعجبی ندارد که چنین حرکتی کاملاً مشهود است.

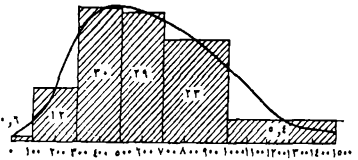
سرعت حرکت براونی دانه نخود بوزن ۰٫۱ گرم فقط 10^{-6} cm/sec خواهد بود. طبیعی است که ما حرکت براونی این ذرات را نمی بینیم.

ما از سرعتهای متوسط ملکول صحبت کردیم. ولی همه ملکولها که با سرعتهای یکسان حرکت نمیکنند. برخیها تندتر حرکت میکنند و برخی دیگر کندتر. همه اینها را میشود محاسبه کرد. در اینجا فقط به ذکر نتایج میپردازیم.

در گرمای قریب ۱۵° C مثلاً سرعت متوسط ملکولهای ازت برابر ۵۰۰ متر در ثانیه است. ۵۹ در صد ملکولهای آن با سرعتهای از ۳۰۰ تا ۷۰۰ متر در ثانیه حرکت میکنند. فقط ۶ دهم درصد با سرعتهای کم از صفر تا ۱۰۰ متر در ثا نیه و فقط ۵٫۴ در صد با سرعتهای بیش از ۱۰۰۰ متر در ثانیه حرکت میکنند (شکل ۹۶).

میتوان تقسیم ملکولها را نیز برحسب مقادیر مختلف انرژی حرکت انتقالی محاسبه کرد.

شماره ملکولهائی که انرژی آنها از دو برابر انرژی متوسط تجاوز میکند، کمتر از ۱۰ در صد است. سهم ملکولهای «پر انرژی تر» با افزایش انرژی بمیزان تصاعدی رفته رفته تحلیل میرود. مثلاً ملکولهائی



شکل ۹۶

که انرژی آنها چهار برابر انرژی متوسط است، فقط ۰٫۷ درصد میباشند، ملکولهای دارای انرژی ۸ برابر انرژی متوسط $۰٫۰۶ \times ۱۰^{-۴}$ درصد و ملکولهای دارای انرژی ۱۶ برابر انرژی متوسط ۲×۱۰^{-۸} درصد میباشند.

انرژی ملکول اکسیژن که با سرعت ۱۱ کیلومتر در ثانیه حرکت میکند مساوی ۳۲×۱۰^{-۱۲} ارگ است. انرژی متوسط ملکول درگرمای اطاق برابر ۶×۱۰^{-۱۴} ارگ میباشد. بدینسان، انرژی «ملکول یازده کیلومتری» لااقل ۵۰۰ بار بیشتر از انرژی ملکول دارای سرعت متوسط است. تعجبی ندارد اگر بگوئیم که سهم ملکولهای دارای سرعتهای بیش از ۱۱ کیلومتر در ثانیه بمیزان غیر قابل تصوری ناچیز است — ردیف $۱۰^{-۳۰۰}$.

ولی باید دید که چرا ما به سرعت ۱۱ کیلومتر در ثانیه توجه معطوف داشته ایم. در صفحه ۱۸۳ گفتیم که فقط اجسامی که دارای این سرعت باشند میتوانند از کرهٔ زمین جدا شوند. یعنی ملکولهائی که به بلندی خیلی زیاد پرتاب شده‌اند، ممکنست رابطه شان با زمین قطع شود و راهی سفر بین سیارات گردند، ولی برای این کار باید دارای سرعت ۱۱ کیلومتر در ثانیه باشند. سهم اینگونه ملکولهای بسیار سریع، بطوریکه ملاحظه میشود، بحدی ناچیز است که خطر تمام شدن آتمسفر کرهٔ زمین حتی بعد از میلیاردها سال هم وجود ندارد.

سرعت گریز آتمسفر بستگی فوق‌العاده شدیدی با نیروی جاذبه $\gamma \frac{Mm}{r}$ دارد.

اگر انرژی سینتیک متوسط ملکول بمیزان خیلی زیادی کمتر از نیروی جاذبه باشد، جدائی ملکولها عملاً امکان پذیر نخواهد بود. نیروی جاذبه در سطح کرهٔ ماه ۲۰ بار کمتر است و در این شرایط نیروی «فرار» ملکول اکسیژن معادل $۱٫۵ \times ۱۰^{-۱۲}$ ارگ میباشد. این مقدار فقط ۲۰ — ۲۵ بار از مقدار انرژی سینتیک متوسط ملکول بیشتر است. سهم ملکولهائی که قادرند از کرهٔ ماه کنده شوند مساوی $۱۰^{-۱۷}$ است که با $۱۰^{-۳۰۰}$ تفاوت زیاد دارد. و محاسبه بیانگر آنست که هوا از کرهٔ ماه با سرعت خیلی زیاد به فضای بین سیارات خواهد رفت. بنابراین تعجبی نیست که در کرهٔ ماه آتمسفر وجود ندارد.

اگر جسمی را حرارت دهیم، حرکت اتمها (ملکولها)ی آن شدت میبابند. آنها شروع به هل دادن همدیگر کرده جای بیشتری را اشغال میکنند. بهمین جهت است که می بینیم کلیه اجسام اعم از جامدات و مایعات و گازها در حین گرمایش انبساط میبابند — واقعیتی که بر همه معلوم است.

انبساط حرارتی گازها را نیازی به توضیح و تشریح زیاد نیست. ما درجه بندی گرماسنجها را بر پایه رابطه‌ی مستقیم گرما با حجم گاز انجام دادیم.

از فرمول $V=\frac{V_{\cdot}}{۲۷۳}\times T$ مشاهده میکنیم که در شرایط فشار ثابت، حجم گاز درحین گرمایش برای هر یک درجه سانتیگراد بقدر $\frac{۱}{۲۷۳}$ (یا ۰٫۰۰۳۷) حجم آن در صفر درجه سانتیگراد افزایش میبابد (این حکم را گاه قانون گی‌لوساک مینا مند).

انبساط اکثر مایعات در شرایط عادی، یعنی در حرارت معمولی اطاق و فشار معمولی‌جو، دو سه بار کمتر از انبساط گازها است.

ما در باره‌ی خودویژگی انبساط آب بتکرار سخن گفتیم. اگر آب را حرارت دهیم، در حین گرمایش از صفر تا ٤ درجه حجم آب با ازدیاد گرما کم میشود. این خصوصیت انبساط آب نقش بسیار بزرگی در زندگی کره‌ی زمین بازی میکند. هنگام پائیز، با سرد شدن تدریجی آب دریاها اقشار سرد شده‌ی بالائی آب متراکم تر میشوند و به ته آب میروند و جای آنها را بلافاصله آب گرم میگیرد. ولی این اختلاط تا موقعی صورت میگیرد که گرمای آب از ٤ درجه سانتیگراد پائین‌تر نرفته باشد. اگر گرمای آب از این میزان تنزل کند، اقشار بالائی آب دریا دیگر متراکم نشده و بنابر این سنگینتر نمیشوند و به ته دریا نمیروند.

با آغاز تنزل گرما از ٤ درجه، قشر بالائی آب بتدریج سرد میشود تا به صفر میر سد و یخ می بندد.

این خصوصیت آبست که مانع میشود از اینکه آب رودخانه تا ته یخ ببندد.

اگر آب ناگهان این ویژگی جالبش را از دست میداد، به آسانی میشود تصور کرد که این امر چه پیامدهای ناگواری در پی میداشت.

انبساط حرارتی اجسام جامد از انبساط حرارتی مایعات بمراتب کمتر است و از انبساط حرارتی گازها صدها و هزارها بار کمتر میباشد.

در بسیاری موارد، انبساط حرارتی اشکالات بزرگی بوجود میآورد. مثلا تغییر اندازه‌های اجزاء وقطعات متحرک ساعت باتغییر گرما، باعث تغییر جریان کار مکانیسم ساعت میشود. البته این درصورتی است که در تهیه‌ی این اجزاء ظریف و حساس هم‌بسته‌ی ویژه‌ی اینوار (از واژه‌ی اینواریانت بمعنی تغییرناپذیر) بکار نبرده با شند.

اینوار فولادیست با محتوی نیکل زیاد که در ابزار سازی زیاد بکار میرود. میله ای که از اینوار تهیه شده باشد، با تغییر حرارت یکدرجه سانتیگراد فقط باندازه‌ی یک میلیونیم طولش تغییر درازا میدهد.

انبساط حرارتی اجسام جامد، با وجود ناچیز بودن مقدارش، میتواند پیامدهای جدی در پی داشته باشد. ضمناً باید دانست که بعلت قلت فشار پذیری اجسام سخت جلوگیری از انبساط حرارتی آنها کار آسانی نیست.

با گرم کردن میله‌ی فولادی بقدر یکدرجه سانتیگراد درازی آن باندازه‌ی یکصدهزارم زیاد میشود — مقداری که اصلا بچشم نمیآید. ولی برای جلوگیری از این انبساط و فشردن و کوتاه کردن میله باندازه‌ی یکصدهزارم نیروئی برابر ۲۰ kgf بر یک سانتیمتر مربع لازمست. و البته این مقدار نیرو فقط برای ازبین بردن تاثیر افزایش گرما بقدر یکدرجه سانتیگراد است!

اگر نیروهائی که در نتیجه‌ی انبساط حرارتی بوجود میآیند در نظر گرفته نشوند و برای مقابله با آنها تدابیری اتخاذ نگردد، ممکنست شکستگیها و سوانح غیر مترقبه ای روی دهد. از جمله مثلاً برای جلوگیری از تاثیر همین نیروهاست که ریل‌های خط آهن را بهم نمیچسبانند و بین آنها فواصل آزاد قرار میدهند. این نیروها را بویژه باید در موارد کار با ظروف شیشه‌ای که در صورت گرمایش ناهمگون خیلی زود سیتر کند، بحساب آورد. بهمین جهت است که امروز در آزمایشگاهها ظروفی از شیشه‌ی کوارتز دار (کوارتز

مذاب — اکسید سیلیسیم که بحالت بی شکل وجود دارد) بکار میبرند که از نقیصه نا مبرده بالا مصون است. تحت تا ثیر گرمایش یکسان، میله مسی باندازه‌ی یک میلیمتر دراز میشود در صورتیکه میله‌ای بهمان ابعاد از شیشه‌ی کوارتزدار بقدر ۴۰ — ۳۰ میکرون که بچشم نمیآید تغییر درازا میدهد.

انبساط حرارتی کوارتز بحدی ناچیز است که میتوان ظرف کوارتزی را تا صدها درجه حرارت داد و بعد آنرا بدون اینکه خطر شکستن آن باشد، درون آب انداخت.

ظرفیت حرارتی

بدیهیست که انرژی درونی جسم به گرما بستگی دارد. هر چه بیشتر لازم باشد جسم را گرم کنیم بهمان میزان انرژی بیشتری مورد نیاز خواهد بود. برای گرم کردن جسم از $T_۱$ به $T_۲$ لازمست بر آن جسم انرژی Q بصورت گرما وارد آید که برابر است با

$$Q = C(T_۲ - T_۱)$$

در این فرمول C ضریب تناسب است که ظرفیت حرارتی جسم نامیده میشود. از فرمول مزبور تعریف مفهوم ظرفیت حرارتی بدست میآید: C عبارت از مقدار حرارتی است که برای افزایش گرما باندازه‌ی یکدرجه سانتیگرد لازمست. خود ظرفیت حرارتی نیز به حرارت وابسته است. مقدار گرمای لازم برای گرم کردن جسمی از صفر به ۱ درجه سانتیگراد با گرمای لازم برای گرم کردن همان جسم از ۱۰۰ به ۱۰۱ درجه سانتیگراد کمی تفاوت دارد.

کمیتهای C معمولا مربوط به یک گرم میباشند و ظرفیتهای حرارتی ویژه نام دارند.

در اینصورت آنها را با حرف c کوچک نشان میدهند.

مقدار گرمای لازم جهت گرم کردن جسمی با جرم m بصورت این فرمول نوشته میشود:

$$Q = mc(T_۲ - T_۱)$$

ما از این ببعد از مفهوم ظرفیت حرارتی ویژه استفاده خواهیم کرد، ولی از لحاظ اختصار همان اصطلاح ظرفیت حرارتی جسم را بکار خواهیم برد. اندازه‌ی مقادیر برای ما همیشه بمنزله‌ی عامل توجیهی تکمیلی خواهدبود.

میدان نوسان مقادیر ظرفیت حرارتی بسیار گسترده است. بدیهیست که ظرفیت حرارتی آب بر حسب کالری برای یک درجه طبق تعریف مساوی ۱ است.

ظرفیت حرارتی غالب اجسام از آب کمتر است. مثلاً ظرفیت حرارتی اکثر روغنها و الکل ها و دیگر مایعات حدود ۰٫۵ $\frac{\text{کالری}}{\text{گرم} \times \text{درجه}}$ است. کوارتز و شیشه و شن ظرفیت حرارتیشان نزدیک ۰٫۲ $\frac{\text{کالری}}{\text{گرم} \times \text{درجه}}$ میباشد. ظرفیت حرارتی آهن و مس حدود ۰٫۱ $\frac{\text{کالری}}{\text{گرم} \times \text{درجه}}$ است. ظرفیتهای حرارتی برخی از گازها از اینقرارند: هیدرژن ۳٫٤ $\frac{\text{کالری}}{\text{گرم} \times \text{درجه}}$، هوا ۰٫۲٤ $\frac{\text{کالری}}{\text{گرم} \times \text{درجه}}$.

ظرفیت‌های حرارتی کلیه‌ی اجسام معمولا با تنزل حرارت کم میشوند و در حرارتهای نزدیک صفر مطلق در خیلی اجسام تا حدود بسیار ناچیزی تنزل میکنند. مثلاً ظرفیت حرارتی مس در حرارت ۲۰ درجه فقط ۰٫۰۰٤۵ است که ۲٤ بار کمتر از مقدار آن در گرمای معمولی اطاق میباشد.

میزان ظرفیت حرارتی میتواند در انجام و ظایف گوناگون مربوط به تقسیم حرارت بین اجسام مورد استفاده قرار گیرد.

تفاوت ظرفیت حرارتی آب و خاک یکی از دلایل تعیین کننده‌ی اختلاف اقلیمی بخشهای دریائی و قاره ایست. آب که ظرفیت حرارتی اش تقریبا پنج بار بیشتر از خاک است، بکندی گرم میشود و بکندی نیز سرد میگردد.

تا بستان، دربخشهای کرانه‌ای، آب کندتر از خشکی گرم میشود و بنابر این هوا را خنک میکند. و در زمستان دریای گرم بتدریج

سرد میشود و گرما را به هوا میدهد و از سرمای هوا میکاهد. بامحاسبه ساده ای معلوم میشود که یک متر مکعب آب دریا ضمن سرد شدن بقدر ۱ درجه سانتیگراد، ۳۰۰۰ متر مکعب هوا را باندازه‌ی ادرجه سانتیگراد گرم میکند.

بهمین جهت دربخشهای کرانه‌ای نوسانات درجه گرما و اختلاف بین گرمای زمستان و تابستان کمتر از مناطق قاره ایست.

رسانائی گرما

هر شیئی میتواند برای هدایت گرما از جسم گرمتر به جسمی که گرمایش کمتر است بمنزله‌ی «پل» باشد. مثلا قاشق چایخوری را که توی استکان پر از چای داغ فروبریم همین وظیفه‌ی «پل» را انجام میدهد. اشیاء فلزی گرما را خیلی خوب انتقال میدهند. قاشق را که توی استکان چای داغ فرو برید، دسته‌ی آن بعد از یک‌ثانیه گرم میشود.

اگر لازم باشد که مخلوط داغی را هم بزنیم، دسته‌ی همزن باید ازچوب یا از پلاسماس باشد. این اجسام جامد گرما را ۱۰۰۰ بار بدتر از فلزات هدایت میکنند. ما در اینجا از «هدایت و انتقال‌گرما» صحبت کردیم. در صورتیکه میشود بهمین ترتیب از «هدایت و انتقال سرما» نیز سخن گفت. البته خواص جسم از اینکه گرما درون آن در کدام جهت حرکت نماید تغییر نمیکند. در روزهای سرد و یخبندان ما از اینکه دستمان را بی دستکش به فلز بزنیم احتیاط میکنیم، ولی بدون هیچ بیم و هراسی دستگیره های چوبی را در دست میگیریم.

چوب، آجر، شیشه، انواع پلاسماس از جمله موادی هستند که گرما را بد هدایت میکنند. آنها را ضمنا عایق گرما نیز مینامند. دیوارهای خانه ها و جدارهای اجاقها و یخچالها را از این مواد درست میکنند.

کلیه فلزات هادی خوبی هستند. مس و نقره از لحاظ هدایت گرما بهترین فلزات بشمار میآیند، آنها گرما را دوبار بهتر از آهن هدایت میکنند.

البته فقط اجسام جامد نیستند که میتوانند نقش «پل» را برای انتقال حرارت بازی کنند. مایعات نیز هادی گرما هستند، ولی بمراتب بدتر

از فلزات، فلزات از لحاظ هدایت گرما صدها بار بر جامدات و مایعات غیر فلزی برتری دارند.

برای اینکه نشان دهیم رسانائی گرمای آب چقدر بد است به چنین آزمایشی دست میزنیم. لوله آزمایشی را که قطعه‌یخی به ته آن محکم شده است از آب پر میکنیم. قسمت بالای لوله را روی شعله گاز میگیریم — آب جوش میآید، در حالیکه از ذوب شدن یخ‌خبری نیست. اگر لوله از فلز بود و آب نداشت، قطعه یخ بلافاصله شروع به ذوب‌شدن میکرد. آب ۲۰۰ بار بدتر از مس گرما را انتقال میدهد.

گازها دهها بار بدتر از اجسام متراکم غیر فلزی هادی گرما هستند. رسانائی گرمای هوا ۲۰۰۰۰ بار کمتر از رسانائی مس است.

رسانائی بد گرما در گازها امکان میدهد که ما قطعه‌ی یخ خشک را که حرارتش $-78\,^\circ C$ — است در دست بگیریم و حتی قطره‌ی آزت مایع را که گرمای آن $-196\,^\circ C$ — است کف دست نگهداریم. اگر این مواد سرد را در مشتمان نفشاریم، هیچ احساس «سوختگی» نخواهیم کرد. در اینجا چنین حالتی بوجود میآید که هنگام غلیان خیلی شدید، قطره‌ی مایع یا قطعه‌ی یخ جا مد از یک «پوشش بخاری» احاطه میشود و این قشر گاز نقش عایق را بازی میکند.

حالت شبه کره (اسفروئیدال) مایع — حالتی که در آن، قطرات از بخار پوشیده‌اند — موقعی بوجود میاید که آب مثلاً روی تاوه‌ی خیلی داغی بریزد. اگر یک قطره آب جوش روی دست ما بریزد، دست را بشدت میسوزاند، هر چند تفاوت حرارت آب جوش و گرمای بدن انسان کمتر از تفاوت گرما های دست انسان و هوای مایع است. دست ما سرد تر از قطره‌ی آب جوش است، بنابر این گرما از قطره دفع میشود، جوشش قطع میگردد و پوشش‌گازی بوجود نمیآید.

بسادگی میتوان تصور کرد که بهترین عایق خلأ است. در خلأ انتقال دهندگان گرما وجود ندارند و رسانائی گرما به کمترین مقدار کاهش مییابد.

بنابر این، اگر ما بخواهیم یک حافظ گرمائی بوجود بیاوریم و جسم گرمی را از سرما و یا سردی را از گرما محفوظ بداریم، بهتر است آن اجسام را درون ظرف دوجداره قرار دهیم و در فضای بین جدارها خلأ ایجاد کنیم، یعنی هوای آنرا بکشیم. دراین آزمایش

با حالت جالبی روبرو میشویم. اگر ضمن کشیدن هوای بین جدارها و رقیق شدن هوا، رسانائی گرمای آنرا اندازه بگیریم و تغییرات آنرا از نظر بگذرانیم، مشاهده میکنیم که تا زمانیکه فشار هوا به چند میلیمتر ستون جیوه نرسیده است، رسانائی گرما عملاً تغییر نمیکند، ولی بمحض اینکه هوا از آنهم رقیقتر شود، در درجات عالی خلاء، انتظار ما برآورده میشود، یعنی رسانائی گرما بشدت افت میکند.

علت چیست؟

برای درک این پدیده باید سعی کنیم مفهوم پدیده‌ی انتقال گرما درگاز را بخوبی تصور کنیم. انتقال گرما از یک‌نقطه‌ی گرم به نقاط سرد از طریق انتقال انرژی از یک ملکول به ملکول مجاور صورت میگیرد. معلوم است که برخوردها و تضاربات ملکولهای سریع با ملکولهای بطی‌الحرکت معمولاً باعث تسریع حرکت ملکول‌های بطی و کند شدن حرکت ملکولهای سریع میشود. و این بمعنی آنست که نقطه‌ی گرم سردتر میشود و سرد گرم میگردد.

چگونه کاهش فشار روی انتقال گرما تاثیر میکند؟ چون کاهش فشار چگالی را پائین میآورد، بنابر این شماره‌ی بر خورد های ملکولهای سریع با بطیء، که در حین آن انتقال انرژی صورت میگیرد، کاهش مییابد. این امر میبایست کاهش رسانائی گرما را در پی میداشت. ولی از سوی دیگر، کاهش فشار سبب افزایش طول میدان حرکت آزاد ملکولها میشود و باین ترتیب آنها میتوانند گرما را به فواصل دور تری منتقل کنند — که این خود به افزایش رسانائی گرما کمک مینماید. محاسبه نشان میدهد که این دو تاثیر متعادل میشوند و قابلیت هدایت گرما تامدتی بعد از کشیدن هوا تغییر نمیکند.

این وضعیت تا آن وقت ادامه دارد که درجه‌ی خلاء هنوز بمیزان قابل ملاحظه ای نرسیده و طول میدان پرواز ملکولها با فاصله بین دو جدار ظرف برابر نشده با شد. وقتی درجه خلاء به این حد رسید، آنوقت هرقدر فشار کاهش یابد، دیگر نمیتواند طول میدان پرواز ملکولها را که اکنون دیگر بین دو جدار در حرکت میباشند تغییر دهد. با این ترتیب ، افت چگالی «متعادل نمیشود» و رسانائی گرما، متناسب با فشار بسرعت کاهش مییابد و بمقادیر خیلی ناچیز که نمایشگر درجه عالی خلاء است میرسد. در ساختمان قمقمه‌ها نیز همین اصل ایجاد خلاء

بکار رفته است. قمقمه‌ها موارد استعمال زیاد دارند. از آنها نه فقط در نگهداری خوراک گرم و سرد، بلکه در علم و تکنیک هم استفاده میشود. و در این موارد آنها را بنام مخترعشان ظروف دیوآر مینامند. در این ظروف (که آنها را گاه باختصار دیوآر میگویند) هوای مایع، آزت‌مایع و اکسیژن مایع حمل و نقل میکنند. ما در بخشهای بعدی خواهیم گفت که چگونه این گزها را بصورت مایع بدست میآورند *.

همروی

از آنچه که در بالا گفته شد چنین سئوالی پیش میآید که اگر رسانائی گرمائی آب اینقدر بداست، پس چطور آب در قوری برقی یا در قابلمه ای که روی اجاق گذاشته شده است بجوش میآید ، و اگر رسانائی گرمای هوا از آب هم بدتر است، پس چگونه در زمستان با روشن کردن بخاری، تمام قسمتهای اطاق بطرز یکسانی گرم میشود؟

آب در قوری بر قی یا قابلمه در اثر قوه‌ی جاذبه‌ی زمین زود جوش میآید. اقشار زیرین آب گرم شده انبساط مییابند و سبک میشوند و به بالای ظرف میروند و جای آنها را آب سرد میگیرد و بهمین تر تیب حر کت آب ادامه مییابد. گرم شدن سریع آب نتیجه‌ی همروی (کنوکسیون بمعنی اختلاط همروی) است. گرم کردن و جوشا نیدن آب در قوری که در موشک بین سیارات قرار دارد، آنقدر آسان نیست.

ما از یک مورد دیگر همروی آب، بدون اینکه از واژه‌ی همروی

---

* اگر بالنهای قمقمه ها را دیده باشید، ملاحظه کرده اید که جدارهایشان همیشه نقره اندود شده است. چرا؟ زیرا رسانائی گرما که ما در این مبحث از آن صحبت کردیم، یگانه وسیله‌ی انتقال گرما نیست. وسیله دیگری هم برای انتقال گرما هست که ما در کتاب دیگری از آن سخن خواهیم گفت — این وسیله‌ی انتقال گرما تشعشع است. در شرایط معمولی تاثیر تشعشع بمراتب ضعیفتر از رسانائی گرماست، ولی بهر صورت محسوس است. نقره اندود کردن جدار های قمقمه نیز بمنظور تضعیف تاثیر تشعشع صورت میگیرد.

نام ببریم، در مبحث قبلی صحبت کردیم — موقعیکه توضیح میدادیم که چرا آب رودخانه در زمستان تا ته یخ نمی بندد.

چرا رادیاتورهای شوفاژ سانترال را نزدیک کف اطاق میگذارند و دریچه‌ی تهویه را درقسمت بالای پنجره باز میکنند؟ در صورتیکه بهتر بود اگر دریچه‌ی تهویه را برای سهولت دسترسی و بازکردن آن در پائین پنجره میگذاشتند و رادیاتورها را برای اینکه مزاحم نباشند نزدیک سقف اطاق قرار میدادند.

اگر ما به این مصلحت‌ها گوش میدادیم و عمل میکردیم، آنوقت بزودی متوجه میشدیم که اطاق توسط رادیاتور گرم نمیشود و با دریچه‌ی باز تهویه نمیگردد.

در مورد هوای اطاق همان جریانی صورت میگیرد که در مورد آب قوری یا قابلمه صورت میگرفت. وقتی رادیاتور شوفاژ سانترال وصل شود، هوای اقشار زیرین اطاق شروع به گرم شدن میکند، منبسط میگردد، سبکتر میشود و به بالا، بسوی سقف میرود و اقشار سنگینتر هوای سرد جای آنها را میگیرند. آنها هم گرم میشوند و بسوی سقف اطاق بالا میروند. بدینسان، در اطاق جریان قطع نشدنی هوا بوجود میآید — هوای گرم از پائین به بالا میرود و هوای سرد از بالا به پائین میآید. در زمستان موقعی که ما دریچه‌ی تهویه را باز میکنیم، جریان هوای سرد را به اطاق راه میدهیم که چون از هوای اطاق سنگینتر است بپائین میرود و هوای گرم را از آنجا میراند، هوای گرم به بالا میرود و از دریچه‌ی تهویه خارج‌میشود.

چراغ نفتی موقعی خوب میسوزد که روی آن لوله لامپای بلندی گذاشته باشند. نباید فکر کرد که این لوله شیشه ای فقط برای حفاظت شعله‌ی چراغ از باد لازم است. چون در هوای کاملاً ساکت و آرام هم می‌بینیم که بمحض اینکه لوله لامپای شیشه‌ای را روی چراغ میگذاریم، بلافاصله چراغ بهتر میسوزد و شعله‌ی آن نورانی تر میشود. نقش لوله‌ی لامپا عبارت از اینست که رسیدن هوا به شعله‌ی چراغ را تقویت میکند، باعث کشش هوا میشود. این عمل بدانجهت صورت میگیرد که هوای درون لوله‌ی لامپا که اکسیژن آن بمصرف سوختن رسیده است بسرعت داغ میشود و ببالا میرود و بجای آن هوای سرد تمیز از سوراخهائی که در سرپیچ تعبیه شده است، داخل لوله میشود.

هرچه لوله‌ی شیشه‌ای بلندتر باشد، چراغ بهتر میسوزد. در واقع سرعت دخول هوای سرد به سرپیچ چراغ به اختلاف وزن ستون هوای داغ توی لوله‌لامپا و هوای سرد خارج آن بستگی دارد. هرچه ستون هوا بلندتر باشد، این اختلاف وزن بیشتر و در نتیجه، سرعت انتقال هوا زیادتر خواهد بود.

بهمین جهت دودکشهای کارخانه‌ها را نیز بلند میسازند. برای کوره های کارخانجات جریان خیلی شدیدهوا و کشش خوب لازم است. دودکشهای بلند این نیاز را برآورده میکنند.

فقدان همروی در موشک محروم از ثقل مانع استفاده از کبریت و چراغ نفتی و اجاقهای گازی در آن میباشد. چون مواد حاصله از احتراق شعله را خاموش میکنند.

هوا هادی بدی است و بکمک آن میتوان گرما را حفظ کرد، بشرط اینکه از همروی، یعنی از انتقال و اختلاط هوای گرم و سرد جلوگیری بعمل آید. همروی خواص عایق حرارتی هوا را از بین میبرد.

جلو گیری از همروی با بکار بردن انواع گوناگون مواد متخلخل و لیفی بعمل میآید. هوا از درون این مواد بزحمت عبور میکند. کلیه اینگو نه مواد فقط از آنجهت که میتوانند قشر هوا را متوقف سازند، عایقهای حرارتی خوبی هستند. در حالیکه رسانائی گرمای خود مواد لیفی یا جدارهای خلل و فرج ممکنست آنقدر هم کم نباشد.

آن پالتوی پوستی خوبست که خز آن پر پشت با شد، یعنی حتی‌المقدور الیاف بیشتری داشته باشد. از پر اردک شمالی لحافهای خیلی‌گرم درست میکنند که وزن هر یک بعلت ظرافت فوق العاده‌ی الیافش از نیم کیلو گرم کمتر است. نیم‌کیلو گرم از این پر میتواند باندازه‌ی دهها کیلوگرم پنبه هوا در خود «نگهدارد».

برای کاهش همروی چهار چوب پنجره‌ها را مضاعف میکنند. هوای بین دو قاب پنجره در اختلاط لایه‌های هوا که در اطاق جریان دارد شرکت نمی‌نماید.

بر عکس، هر گو نه حرکت هوا جریان اختلاط را شدید میکند و انتقال گرما را افزایش میدهد. بهمین جهت است که ما هر وقت گرممان است و میخواهیم زود تر خنک شویم، با بادبزن خودمان را باد میزنیم یا اینکه باد بزن برقی را وصل میکنیم. و بهمین جهت موقعیکه

باد میوزد ما احساس خنکی میکنیم. ولی اگر درجه گرمای هوا بیشتر از گرمای بدن ما باشد، آنوقت اختلاط نتیجه‌ی عکس میدهد و وزش باد مثل تنفس هوای گرم احساس میشود.

وظیفه‌ی دیگ بخار عبارت از آنست که هر چه ممکنست سریعتر بخار با درجه حرارت لازم بدست آورد. برای این کار همروی طبیعی در میدان ثقل بهیچوجه کافی نیست. بنابراین ایجاد جریان شدید آب و بخار که باعث اختلاط اقشار گرم و سرد شود، یکی از مسائل اساسی است که در ساختمان دیگهای بخار باید در نظر گرفته شود.

حالات ماده

بخار آهن و هوای جامد

آیا واقعا چنین چیزهائی در طبیعت و جود دارند، یا اینکه فقط ترکیب ساده ای از کلما تند؟ هر قدر هم مفاهیم بالا عجیب بنظر برسند، باید بگوئیم که هم بخارآهن در طبیعت وجود دارد و هم هوای‌جامد، منتها نه در شرایط عادی.

پس در چه شرایطی؟ حالت جسم را دو عامل: گرما و فشار تعیین میکنند.

شرایطی که ما در آن زندگی میکنیم در حدود نسبتا کم و محدودی تغییر مینماید. فشار هوا در حدود چند درصد پیرامون یک آتمسفر (kgf/cm^2 ۱) نوسان میکند. حدود تغییر گرمای هوا مثلاً دربخش مسکو در فاصله از -30° تا $+30^\circ$ گرماسنج است. و درمقیاس گرماهای مطلق که در آن کمترین گرمای ممکن (-273°) صفر گرفته میشود، این فاصله کمتربچشم میخورد: از ۲۴۰ تا ۳۰۰ درجه کلوین میباشد که در این صورت نیز میدان تغییر در حدود ۱۰± درصد مقدار متوسط است.

کاملا طبیعی است که ما به این شرایط عادی خو گرفته ایم و بنابر این ضمن بیان حقایق ساده ای نظیر مثلاً: «آهن جامد است، هوا گاز است» و نظایر آنها، فراموش میکنیم که عبارت «درشرایط عادی» را به گفته خود علاوه کنیم.

اگر ما آهن را حرارت بدهیم ، ابتدا ذوب میشود و بعد بخار میگردد. و اگر هوا را سرد کنیم، اول تبدیل به مایع میشود و بعد سخت و جامد میگردد.

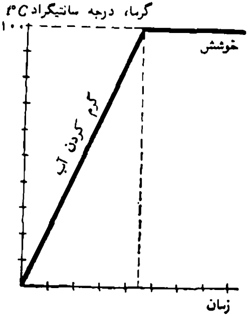
حتی اگر خواننده هیچوقت هم به بخارآهن و هوای جامد بر خورد نکرده باشد، مسلما این نکته را قبول خواهد کرد که هر جسمی را باتغییر حرارت میتوان به حالات گوناگون: هم جامد، هم مایع و هم بشکل گاز، و یا باصطلاح، در فازهای جامد و مایع و گازی شکل بدست آورد.

قبول این نکته کار آسانی است، زیرا هرکس مادهای هست که بدون آن زندگی در روی زمین وجود نخواهد داشت، و آنرا هر کسی هم بشکل گاز، هم بصورت مایع و هم بحالت جامد دیده است — و این ماده آب است.

حال ببینیم درچه شرایطی تبدیل جسم از حالتی به حالت دیگر صورت میگیرد؟

جوشش

اگر گرماسنج را در ظرف آبی که روی اجاق برقی قرار داده شده است فرو بریم و کلید اجاق را به برق وصل کنیم، خواهیم دید که: تقریبا بلافاصله سطح جیوه در گرماسنج بالا میرود و به °۹۰، °۹۵ و بالاخره به °۱۰۰ میرسد. آب شروع به جوشش میکند و از این ببعد دیگر سطح جیوه بالا نمیرود. آب چند دقیقه میجوشد. ولی سطح جیوه تغییر نمیکند. تا موقعی که تمام آب نجوشیده است، گرما تغییر نخواهد کرد (شکل ۹۷).



شکل ۹۷

پس اگر درجه گرمای آب تغییر نمیکند، پس گرمای اجاق بمصرف چه میرسد؟ پاسخ این پرسش روشن است. جریان تبدیل آب به بخار مستلزم مصرف انرژیست.

انرژی یک گرم آب را با یک گرم بخار حاصله از آن

مقایسه کنیم. ملکولهای بخار در مقایسه با ملکولهای آب در فواصل دور تری از هم قرار دارند. واضحست که در نتیجه این امر انرژی پتانسیل آب از انرژی پتانسیل بخار متفاوت خواهد بود.

انرژی پتانسیل ذرات متجاذب با نزدیک شدن آنها بهمدیگر کاهش مییابد. از اینجهت انرژی بخار بیشتر از انرژی آبست، و تبدیل آب به بخار مستلزم مصرف انرژی است. این انرژی اضافی از اجاق برقی به آبی که در ظرف میجوشد داده میشود.

انرژی لازم برای تبدیل آب به بخار انرژی تبخیر نامیده میشود. برای تبدیل یک گرم آب به بخار ۵۳۹ کالری (این رقم برای گرمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد است) لازمست.

اگر برای یک گرم آب ۵۳۹ کالری لازمست، پس برای یک ملکول گرم آب کالری ۹۷۰۰=۵۳۹×۱۸ لازم خواهدبود. این مقدار کالری باید برای قطع ارتباطات بین ملکولها مصرف شود.

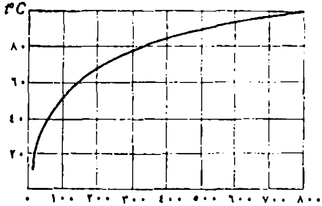
این رقم را میتوان با مقدار کار لازم برای قطع ارتباطات درون ملکولی مقایسه کرد. برای اینکه ملکول گرم بخار آب به اتمهایش تجزیه شود حدود ۲۲۰۰۰۰ کالری، یعنی ۲۵ بار انرژی بیشتر لازمست. از اینجا بلافاصله ضعف نیروهائی که ملکولها را بهم مربوط میسازند در مقایسه با نیروهائی که انمها را درون ملکول بهم متصل میکنند بخوبی مشاهده میشود.

وابستگی گرمای جوشش به فشار

گرمای جوشش آب ۱۰۰ درجه سانتیگراد است. ممکنست تصور شود که این خاصیت از خواص تفکیک نا پذیر آبست که در هرجا و هر شرایطی هم که قرار گرفته باشد، در ۱۰۰ درجه سانتیگراد جوش میآید.

ولی اینطور نیست، و این را ساکنان نقاط بلند کوهستانات خوب میدانند.

نزدیک قله البرز خانه‌ای برای جهانگردان و یک ایستگاه علمی هست. تازه واردین تعجب میکنند که «تخم مرغ در آب جوش چه



شکل ۹۸

بزحمت میپزد» یا اینکه «چرا آب جوش نمیسوزاند؟» البته به آنها توضیح میدهند که در قله البرز آب در گرمای ۸۲ درجه سانتیگراد جوش میآید.

حال ببینیم که چه عامل فیزیکی است که در پدیده‌ی جوشش تاثیر میکند. بلندی نقطه نسبت به سطح در یا چه تاثیری دارد؟

این عامل فیزیکی همانا فشار موثر بر سطح مایع است. برای آزمایش صحت این تاثیرات نیازی به صعود به قله‌ی کوه نیست.

اگر آبی را که میخواهیم جوش بیاوریم در ظرف سر بسته ای ریخته و آنرا حرارت دهیم و با تلمبه هوا به آن بدمیم یا هوای آنرا بیرون بکشیم ملاحظه میکنیم که گرمای جوشش با افزایش فشار هوای درون ظرف بالا میرود و با کم شدن آن پائین میآید.

آب فقط در فشار معین ۷۶۰ میلیمتر ستون جیوه در ۱۰۰ درجه سانتیگراد جوش میآید.

منحنی گرمای جوشش بر حسب فشار در شکل ۹۸ نشان داده شده است. در قله البرز فشار هوا ۰٫۵ آتمسفر است و در این فشار، بطوریکه منحنی نشان میدهد، گرمای جوشش ۸۲ درجه سانتیگراد میباشد.

با این ترتیب، مثلاً با آبی که در فشار هوای ۱۰ تا ۱۵ میلیمتر ستون جیوه میجوشد، میتوان در هوای گرم آب تنی کرد و خنک شد،

چون در این درجه فشار، گرمای جوشش آب به ۱۰ تا ۱۵ درجه سانتیگراد کاهش مییابد.

میتوان آب را حتی در گرمای انجماد آن جوشاند. برای این کار فشار هوا باید به ۴٫۶ میلیمتر ستون جیوه کاهش یابد.

اگر ظرف سر باز محتوی آب را زیر کاسه‌ای بگذاریم و کاسه را به تلمبه‌ای وصل کنیم و هوای توی آنرا بکشیم، منظره‌ی جالبی مشاهده میشود. بیرون کشیدن هوا آب را وادار میکند که جوش بیاید. ولی جوشش مستلزم گرماست، و چون منبع گرمائی وجود ندارد، آب مجبور میشود انرژی خود را بدهد. درجه‌ی گرمای آب درحال جوشش شروع به افت میکند، ولی چون تخلیه‌ی هوای ظرف ادامه دارد، آب مرتبا سرد میشود و سر انجام یخ میبندد.

اینگو نه جوشش آب سرد فقط با تخلیه هوا حاصل نمیشود. مثلا در موقع چرخش پروانه‌ی کشتی، فشار در قشر آبی که در جوار سطح فلز بسرعت حرکت میکند شدیدا کاهش مییابد و آب در این قشر شروع به جوشیدن میکند، یعنی در آن مقدار زیادی حباب مملو از بخار پدید میآید. این پدیده را کاویتاسیون (از واژه‌ی لاتینی کاویتاس بمعنی حفره) مینامند.

ما دیدیم که با پائین آوردن فشار، گرمای جوشش کاهش مییابد. پس با افزایش فشار چطور؟ نموداری شبیه شکل ۹۸ به این پرسش پاسخ میدهد. فشار ۱۵ آتمسفر ممکنست جوشش را خیلی بتأخیر بیاندازد. در چنین فشاری آب در ۲۰۰ درجه سانتیگراد میجوشد، و فشار ۸۰ آتمسفر آب را در ۳۰۰ درجه سانتیگراد وادار به جوش آمدن میکند.

بدینسان، هر فشار خارجی معین گرمای جوشش معینی را الزام میکند. ضمنا این حکم را میتوان «وارونه» ساخت وگفت: هر درجه گرمای جوشش آب فشار معینی را الزام مینماید. این فشار کشسانی بخار نام دارد.

منحنی نمایش گرمای جوشش برحسب فشار در عین حال منحنی نمایش کشسانی بخار برحسب گرما نیز هست. ارقام برده شده در نمودار گرمای جوشش (یا نمودار کشسانی بخار) نشان میدهند که کشسانی بخار با تغییر گرما با شدت زیادی تغییر میکند. در گرمای

صفر درجه سانتیگراد (یعنی $273^\circ K$) کشسانی بخار برابر ۴٫۶ میلیمتر ستون جیوه است و در $100^\circ C$ ($373^\circ K$) مساوی ۷۶۰ میلیمتر میباشد، یعنی ۱۶۵ بار افزایش مییابد. اگر گرما دو برابر شود (از صفر درجه C بعبارت دیگر از $273^\circ K$ به ۲۷۳ درجه سانتیگراد یعنی $546^\circ K$ برسد)، کشسانی بخار از ۴٫۶ میلیمتر ستون جیوه به قریب ۶۰ آتمسفر میرسد، یعنی تقریبا ۱۰۰۰۰ بار افزایش مییابد.

باین ترتیب، تغییر گرمای جوشش برحسب فشار، برعکس ، خیلی بکندی صورت میگیرد. اگر فشار دو برابر شود — مثلاً از ۰٫۵ آتمسفر به ۱ آتمسفر تغییر کند، گرمای جوشش از $82^\circ C$ (یعنی $355^\circ K$) به $100^\circ C$ (یعنی $373^\circ K$) افزایش مییابد و با افزایش مضاعف فشار از ۱ آتمسفر به ۲ آتمسفر گرمای جوشش از $100^\circ C$ (یعنی $373^\circ K$) به $120^\circ C$ (یعنی $393^\circ K$) بالا میرود.

همین منحنی مورد بحث ما تعیین کنندهی قوانین تراکم (تغلیظ) بخار و میعان آن نیز میباشد.

تبدیل بخار به مایع هم با انقباض و تراکم آن ممکنست و هم با تبرید آن.

در جریان تراکم نیز مثل هنگام جوشش، تا تبدیل بخار به مایع، یا مایع به بخار تماما انجام نگرفته است، نقطه از روی منحنی حرکت نخواهد کرد. این پدیده را میتوان باین صورت نیز بیان داشت: همزیستی مایع و بخار در شرایط منحنی ما وفقط در این شرایط امکان پذیر است. اگر در این حالت درجه گرما کم یا زیاد نشود، مقادیر بخار و مایع در ظرف سربسته بدون تغییر خواهند ماند. درچنین حالتی میگویند که بخارومایع در حالت تعادل قرار دارند، و بخاری‌را که با مایعش در حال تعادل باشد، اشباع شده خوانند.

بطوریکه ملاحظه میشود، منحنی جوشش و تراکم مفهوم دیگری هم دارد و آن تعادل مایع و بخار است. این منحنی تعادل صفحهی دیاگرام را به دوبخش تقسیم میکند. طرف چپ و بالا (جانب گرماهای بیشتر و فشارهای کمتر) منطقهی حالت استوار بخار و طرف راست و پا ئین — منطقهی حالت استوار مایع قرار دارد.

منحنی تعادل بخار — مایع، یعنی منحنی وابستگی گرمای جوشش به فشار، و یا وابستگی کشسانی بخار به گرما تقریبا برای همه مایعات

یکی است. در پاره‌ای موارد، تغییر ممکنست کمی شدیدتر و در دیگر موارد — نسبتا کندتر باشد، ولی همیشه کشسانی‌بخار با افزایش گرما بسرعت رشد میبابد.

تاکنون ما بارها واژه های «گاز» و «بخار» را بکار برده‌ایم. این دو واژه مفاهیم خیلی یکسانی دارند. مثلا میتوان گفت که گاز آب بخار آب است، گاز اکسیژن بخارمایع‌اکسیژن است. معهذا در استفاده ازاین دو واژه خصوصیاتی بر حسب عادت بوجود آمده است. مثلاً چون ما به درجات گرمای معین و نسبتا کمی عادت کرده‌ایم، بنابراین واژه‌ی «گاز» را ما معمولا در مورد موادی بکار میبریم که کشسانی بخار آنها در درجات معمولی گرما بالاتر از فشار آتمسفر است. برعکس، واژه‌ی بخار را در مواردی بکار میبریم که ماده در گرمای معمولی اطاق و فشار آتمسفر، بیشتر در حالت مایع ثابت و پایدار است.

تبخیر

جو شش جریانی است سریع و از آب در حال جوشش طی مدت کوتاهی اثری باقی نمی‌ماند و همه‌ی آن تبدیل به بخار میشود.

ولی پدیده‌ی دیگری هم برای تبدیل آب یا هر مایع دیگری به بخارهست، و آن تبخیر است. تبخیر در هر گرمائی، بدون وابستگی به فشار که در شرایط عادی همیشه حدود ۷۶۰ میلیمتر ستون جیوه است انجام میگیرد. تبخیر بر خلاف جوشش جریانی است که خیلی بکندی صورت میگیرد. اگر شیشه ادکلنی را در باز بگذاریم، بعد از چند روز ملاحظه میکنیم که چیزی در آن نمانده است. آب توی نعلبکی مدت بیشتری میماند، ولی آن هم دیر یا زود خشک خواهدشد.

هوا در جریان تبخیر نقش مهمی ایفا میکند. هوا بخودی‌خود مانع تبخیر آب نمیشود. بمحض اینکه سطح مایع را باز کنیم، ملکولهای آب به قشر بلافاصله‌ی هوای مجاور میروند. چگالی بخار در این قشر بسرعت افزایش مییابد. بعد از مدت کمی فشار بخار با کشسانی موافق با گرمای محیط برابر خواهدشد. در این حالت کشسانی بخار درست برابر موقعی خواهدشد که هوا نباشد.

البته انتقال بخار به هوا بمعنی افزایش فشار نیست. فشار کلی در فضای بالای سطح آب زیاد نمیشود، فقط سهم بخار در این فشار افزایش مییابد و در نتیجه سهم هوا که بخار آنرا بیرون رانده و جایش را گرفته است، کم میشود.

روی آب بخار مخلوط با هواست و بالاتر از آن اقشار هوای بدون‌بخار میباشند. این اقشار هوا نیز ناگزیر با بخار مخلوط خواهندشد. چون بخارآب لا ینقطع داخل اقشار بالاتر میشود و جای آنرا در قشر زیرین، هوای فاقد ملکولهای آب میگیرد. ازاین‌رو در قشر بلافاصله مجاور آب دائما جاهائی برای ملکولهای تازهٔ آب خالی خواهد شد. آب بطور مداوم بخار میشود و فشار بخار آب در سطح را برابر کشسانی نگاه میدارد و این جریان تا موقعی که آب تماما تبخیر شود ادامه خواهد یافت.

ما از مثال ادکلنی و آب شروع کردیم. بخوبی معلو مست که سرعت تبخیر آنها متفاوتست. اتر با سرعت فوق العاده‌ای میپرد. سرعت تبخیر الکل نسبتا زیاد و سرعت تبخیر آب خیلی کمتر است. اگر ما مقادیر کشسانی بخارهای این مایعات را مثلاً در گرمای معمولی اطاق بدست آوریم، علت متفاوت بودن سرعتهای تبخیر بلا فاصله معلوم میشود. ارقام کشسانی فشارهای نامبرده ازاینقرارند: اتر ۴۳۷ میلیمتر، الکل ۴۴,۵ میلیمتر و آب ۱۷,۵ میلیمتر ستون جیوه.

هرچه کشسانی بیشتر باشد، مقدار بخار در قشر مجاور هوا همانقدر بیشتر و سرعت تبخیر مایع همانقدر زیادتر است. ما میدانیم که کشسانی بخار با افزایش گرما زیاد میشود. از اینجا معلوم میشود که چرا سرعت تبخیر با گرم کردن مایع افزایش مییابد.

تغییر سرعت تبخیر از راه دیگری هم ممکنست. مثلاً اگر بخواهیم بر سرعت تبخیر بیفزائیم، باید بسرعت بخار حاصله را از سطح مایع دور کنیم، یعنی اختلا ط هوا را تسریع نمائیم. بهمین جهت است که با بادزدن مایع سرعت تبخیر آن زیاد میشود. آب گرچه کشسانی بخارش نسبتا کم است، ولی اگر نعلبکی محتوی آب را در مقابل باد بگذاریم، آب آن خیلی بسرعت تبخیر شده از بین میرود.

از اینجا معلوم میشود که چرا شناگر که از آب بیرون میآید در مقابل باد احساس سرما میکند. باد اختلاط هوا و بخار را تسریع میکند

و بنابر این تبخیر سریعتر صورت میگیرد، و گرمای لازم برای تبخیر را بدن شخص مجبور است بدهد.

کمی و زیادی مقدار بخار آب در هوا در احوال انسانها موثر است. هوا چه خیلی خشک باشد و چه خیلی نمناک نا مطبوع است. رطوبت ۶۰ در صد عادی محسوب میشود و این میزان رطوبت بمعنی آنست که چگالی بخار آب ۶۰ در صد چگالی بخار آب اشباع شده در همان درجه حرارتست.

اگر هوای مرطوب را سرد کنیم، سر انجام فشار بخارهای آب درون آن با کشسانی بخار در این حرارت برابر میشود. بخار اشباع میگردد و اگر باز هم گرما را کم کنیم، شروع به مایع شدن خواهد کرد. پیدایش شبنم صبحگاهی روی علفها و برگها نتیجه‌ی همین پدیده است.

در گرمای ۲۰ درجه سانتیگراد چگالی بخارهای آب اشباع شده قریب $\frac{g}{cm^3}$ ۰٫۰۰۰۰۲ است. ما موقعی خودمان را خوب احساس خواهیم کرد که میزان بخارهای آب موجود درهوا ۶۰ در صد این‌مقدار، یعنی فقط کمی بیش از یک‌صدهزارم گرم در ۱ سانتیمتر مکعب باشد.

این رقم هرچند خیلی کوچک است، ولی برای یک اطاق مقدار زیادی آب خواهد شد. به آسانی میتوان محاسبه کرد که در اطاقی به ابعاد متوسط: بمساحت ۱۲ متر مربع و بلندی ۳ متر قریب یک کیلوگرم آب میتواند بصورت بخار اشباع شده «بگنجد».

یعنی اگر چنین اطاقی را کیپ ببندیم بطوریکه هیچ منفذی به خارج نداشته با شد و بشکه‌ی آبی در آن بگذاریم، مقدار آب درون بشکه هرچه باشد، یک لیتر آن بخار خواهدشد.

مقایسه‌ی این نتیجه که برای آب بدست آمده است با ارقام مربوطه برای جیوه جالبست. در همان گرمای $20°C$ چگالی بخار اشباع شده‌ی جیوه 10^{-8} g/cm^3 است و در اطاق با ابعاد نامبرده بالا حد اکثر یک گرم جیوه خواهد گنجید.

لازم به تذکر است که بخارهای جیوه خیلی سمی هستند و یک گرم بخار جیوه میتوا ند به تندرستی هر شخصی لطمه‌ی جدی بزنند. بنابراین، هنگام کار با جیوه باید مراقب بود که حتی یک قطره‌ی ریز آن هم بیرون نریزد.

چگونه میشود گاز را بصورت مایع در آورد؟ دیا گرام جوشش به این پرسش پاسخ میدهد. برای تبدیل گاز به مایع باید یا درجه‌ی حرارت را کاهش داد یا اینکه فشار را زیاد کرد.

در سده‌ی نوزدهم افزایش فشار خیلی آسانتر از کاهش درجه‌ی حرارت بود. در اوایل این قرن فیزیکدان انگلیسی میچل فارادی توانست گازها را تا حدود کشسانی بخارهایشان متراکم سازد و از این راه بسیاری گازها (گاز کلر، اسید کربنیک و دیگر گازها) را بصورت مایع در آورد.

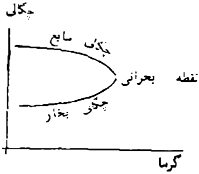
ولی برخی از گازها از قبیل هیدرژن، آزت، اکسیژن بهیچوجه بحال مایع در نمی‌آمدند. هراندازه فشار را زیاد میکردند تاثیری نداشت و این گازها مبدل به مایع نمیشدند. چنین تصور میشد که اکسیژن و دیگر گازهای نامبرده اصولاً قابل تبدیل به مایع نیستند و آنها را گازهای حقیقی یا دائمی بشمار میاوردند.

ولی در واقع این عدم موفقیت ناشی از عدم درک یک نکته‌ی مهم بود.

مایع و بخار را درحالت تعادل در نظر بگیریم و فکر کنیم که با افزایش درجه‌ی حرارت، که البته با افزایش متناسب فشار توام میباشد، چه روی خواهدداد. بعبارت دیگر، تصور کنیم که نقطه روی دیاگرام جوشش در طول منحنی بسوی بالا حرکت میکند. بدیهیست که مایع باافزایش درجه حرارت منبسط میشود و چگالی آن کاهش مییابد. در مورد بخار باید بگوئیم که ازدیاد درجه‌ی حرارت جوشش البته به انبساط آن کمک میکند، ولی بطور یکه گفته شد، فشار بخار اشباع شده خیلی سریعتر از درجه‌ی حرارت جوشش زیاد میشود. بنابراین چگالی بخار نه اینکه کم نمیشود، بلکه با بالارفتن درجه‌ی حرارت جوشش افزایش مییابد.

چون چگالی مایع کم میشود و چگالی بخار زیاد میگردد. بنابراین ما ضمن حرکت «ببالا» روی منحنی جوشش، ناگزیر به نقطه‌ای خواهیم رسید که درآن نقطه چگالیهای مایع وبخار برابر میشوند (شکل ۹۹).

در این نقطه‌ی جالب که نقطه بحرانی نامیده میشود، منحنی جوشش



شکل ۹۹

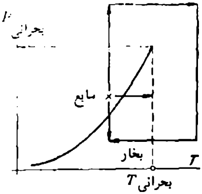
قطع میگردد، چون تمام تفاوتهای بین گاز و مایع مربوط به اختلاف چگالیهای آنهاست، در نقطه‌ی بحرانی، خواص مایع و گاز یکسان میشوند. هر ماده‌ای دارای درجه‌ی حرارت بحرانی و فشار بحرانی ویژه خود میباشد. مثلاً برای آب، نقطه‌ی بحرانی با حرارت ۳۷۴°C و فشار ۲۱۸,۵ آتمسفر مطابق است.

اگر گازی را که درجه‌ی حرارت آن پائینتر از درجه‌ی حرارت‌بحرانی است تحت فشار قراردهیم، جریان تراکم و انقباض آن با سهمی که منحنی جوشش را قطع میکند (شکل ۱۰۰) نمایش داده میشود. این بدانمعنی است که درلحظه‌ای که فشار بمیزانی میرسد که با کشسانی بخار برابر میشود (نقطه‌ی تقاطع سهم با منحنی جوشش)، گاز شروع به میعان خواهد کرد. اگر ظرف ما شفاف باشد، در این لحظه آغاز پیدایش قشری از مایع درکف ظرف مشاهده میگردد. در فشار ثابت، قشر مایع تا وقتی که سر انجام همه‌ی گاز به مایع مبدل شود افزایش خواهد یافت. انقباض بازهم بیشتر مستلزم افزایش فشار است.

در مورد انقباض گازی که درجه‌ی حرارت آن بیش از حرارت بحرانی است، جریان بکلی صورت دیگری پیدا میکند. جریان انقباض را بازهم میتوان بصورت سهمی که از پائین به بالا میرود نمایش داد. ولی حالا دیگر این سهم منحنی جوشش را قطع نمیکند. باین ترتیب، بخار در حین انقباض تبدیل به مایع نمیشود، فقط پیوسته متراکم میگردد.

در درجات حرارت بالای حرارت بحرانی وجود میعان و گاز جدا ازهم ممکن نیست. هر اندازه‌هم که گاز متراکم شود، زیر پیستون ماده‌ی یکجنسی خواهد بود که تشخیص اینکه چه وقت میتوان آنرا گاز نامید و چه وقت مایع — مشکل است.

وجود نقطه‌ی بحرانی نشان میدهد که بین حالت مایع و گازی شکل ماده تفاوت اصولی وجود ندارد. ابتدا ممکنست چنین بنظر رسد که فقدان تفاوت اصولی فقط در مورد درجات حرارت مافوق حرارت بحرانی



شکل ۱۰۰

است. ولی در واقع اینطور نیست. وجود نقطه‌ی بحرانی نشان میدهد که مایع را — مایع حقیقی را که میشود در استکانی ریخت — میتوان بدون هیچگو نه جوششی بحالت گازی شکل در آورد.

این طریقه‌ی تبدیل در شکل ۱۰۰ نشان داده شده است. علامت صلیب نمایشگر مایع مورد بحث است. اگر فشار را کمی پائین بیاوریم (سهم بسوی پائین)، مایع شروع به جوشیدن خواهد کرد، وحتی اگر درجه‌ی حرارت را کمی بالا ببریم (جهت سهم براست)، بازهم مایع شروع به جوشیدن خواهد نمود، ولی ما بکلی بگونه ای دیگر عمل خواهیم کرد. مایع را بشدت تا فشار بیش از فشار بحرانی متراکم میکنیم. نقطه‌ی نمودار حالت مایع روی خط قائم بالا میرود. بعد مایع را حرارت میدهیم — این جریان بصورت سهمی افقی نمایش داده میشود. حالا بعد از اینکه ما در سوی را ست درجه‌ی حرارت بحرانی قرار گرفتیم، فشار را تا میزان اولیه‌اش پائین میآوریم. اگر حالا درجه‌ی حرارت را کم کنیم، میتوان بخار حقیقی بدست آورد، یعنی بخاری که میشد بطریق ساده‌تر و کوتاهتر از این مایع بدست بیاید.

با این ترتیب، با تغییر دادن فشار و حرارت در حول نقطه‌ی بحرانی میتوان با تبدیل مداوم مایع به بخار ویا بخار به مایع، بخار یا مایع بدست آورد. این جریان تبدیل مداوم مستلزم جوششی یا میعان نیست.

تلاشهای دانشمندان پیشین در مورد مایع کردن گازهائی نظیر اکسیژن، آزت، و هیدرژن از اینجهت با ناکامی مواجه میگشت که آنها از وجود درجه‌ی حرارت بحرانی هنوز بی‌اطلاع بودند. درجه‌ی حرارت بحرانی این گازها خیلی پائین است، از اینقرار: آزت $-۱۴۷^\circ C$، اکسیژن $-۱۱۹^\circ C$ — و هیدرژن $-۲۴۰^\circ C$ — یا $۳۳^\circ K$. در میان آنها هلیوم با درجه حرارت بحرانی برابر $۴,۳^\circ K$ رکورد را شکسته است. تبدیل این گازها به مایع فقط از یک راه ممکنست و آن اینکه درجه‌ی حرارت را از مقادیر نامبرده بالا پائینتر بیاوریم.

درجات حرارت خیلی پائین از راههای گوناگون بدست میآید. ولی فکر اصلی در کلیه آنها یکی است: باید جسمی را که میخواهیم حرارتش را پائین بیاوریم وادار کنیم که انرژی درونیش را از دست بدهد.

چگونه میشود این فکر را عملی ساخت؟ یکی از راهها عبارت از اینست که مایع را وادار کنیم بجوشد، بدون اینکه از خارج به آن گرما برسانیم. برای این کار، بطوریکه میدانیم، باید فشار را کم کرد و آنرا تا میزان کشسانی بخار پائین آورد. حرارتی‌که باید بمصرف جوشش برسد، از مایع گرفته خواهد شد و حرارت مایع و گاز و بهمراه آنها کشسانی‌گاز نیز کاهش خواهند یافت. بنابراین برای اینکه جوشش قطع نشود و سریعتر صورت گیرد، باید از ظرف مایع دائما هوا را بیرون کشید.

ولی کاهش درجه‌ی حرارت دراین جریان حدی دارد: کشسانی بخار بالاخره بمیزان خیلی ناچیزی میرسد و حتی نیرومندترین تلمبه های هواکش نخواهند توانست فشار لازم را بوجودآورند.

برای اینکه جریان تقلیل درجه‌ی حرارت را ادامه دهیم، میتوانیم با سرد کردن گاز توسط مایعی که بدست آمده است، آن گاز را نیز به مایع با حرارت جوشش خیلی پائینتر مبدل کنیم. اینک جریان تخلیه هوا را میتوان با ماده‌ی دومی تکرار کرد و باین ترتیب درجات خیلی پائینتر حرارت را بدست آورد. در صورت لزوم، این شیوه‌ی «متوالی» بدست آوردن حرارتهای خیلی‌پائین را میتوان ادامه داد.

در اواخر سده ی گذشته نیز به این طریق عمل میکردند و میعان گازها را در مراحل متوالی انجام میدادند: متوالیا گازهای اتیلن، اکسیژن، ازت، هیدرژن با درجات حرارت جوشش ۱۰۳° —، ۱۸۳° —، ۱۹۶° —، و ۲۵۳°C — را تبدیل به مایع میکردند. با دردست داشتن هیدرژن مایع میتوان مایع دارای پائینترین درجه‌ی حرارت‌جوشش — هلیوم (۲۶۹°C —) را بدست آورد. همسایه‌ی «سمت‌چپی» کمک میکرد که همسایه‌ی «سمت‌راستی» پیدا شود.

شیوه‌ی متوالی تبرید متعلق به صد سال پیش است. در سال ۱۸۷۷ با بکار بردن این شیوه هوای مایع بدست‌آمد. درسالهای

۱۸۸۴ — ۱۸۸۵ نخستین بار هیدرژن مایع بدست آوردند. سرانجام، بیست سال بعد، آخرین دژ مستحکم نیز بتصرف در آمد. هلیوم که پائینترین درجه‌ی حرارت‌بحرانی را دارا میباشد، تو سط کامرلینگ‌انس در شهر لیدن (هلند) به مایع مبدل گردید.

آزمایشگاه لیدن سالهای متوالی یگانه آزمایشگاه «درجات حرارت پائین» بود. ولی حالا در کلیه کشورها دهها از این آزمایشگاهها وجود دارند، غیر از کارخانه‌هائی که هوای مایع برای مقا صد فنی تولید میکنند.

اکنون شیوه‌ی متوالی بدست آوردن درجات حرارت پائین خیلی بندرت بکار میرود. در دستگاههای فنی برای کاهش حرارت شیوه‌ی دیگر تقلیل انرژی درونی گاز را بکار میبرند: گاز را وادار میکنند که بسرعت توسعه یا بد و با مصرف انرژی درونیش کار انجام دهد.

مثلاً اگر هوائی را که تا چند آتمسفر فشرده شده باشد داخل اتساع دهنده نمائیم، در اثر انجام کار جابجا شدن پیستون و یا چرخش توربین، هوا چنان بسرعت سرد میشود که تبدیل به مایع میگردد. اگر گاز کر بنیک را بسرعت از بالنی خارج کنیم چنان آناً سرد میشود که حتی در هوا بصورت «برف» در میآید.

گازهای مایع موارد استعمال گسترده‌ای در کارهای فنی دارند. اکسیژن مایع در تکنیک انفجاری بعنوان یکی از اجزاء مرکبه‌ی مخلوط سوخت در موتورهای جت بکار میرود.

از میعان هوا در امور فنی برای جداسازی گازهای متشکله هوا استفاده میشود که بعدا از آن سخن خوهد رفت.

از دمای هوای مایع در رشته‌های گونا گون تکنیک بصورت گسترده‌ای استفاده میشود. ولی این دما برای بسیاری از پژوهشگران فیزیک بقدر کافی پائین نیست. واقعا هم اگر درجات سانتیگراد را بمقیاس دمای مطلق تبدیل کنیم خواهیم دید که دمای هوای مایع در حدود $\frac{۱}{۳}$ درجه حرارت معمولی اطاق است. برای یک دانشمند فیزیک دماهای «هیدرژنی»، یعنی دماهائی در حوالی ۱۴ — ۲۰ $^{\circ}K$ و بویژه دماهای «هلیومی» بیشتر مورد توجه اند. پائینترین در جه حرارت حاصله از تبخیر هلیوم مایع معادل ۰٫۷ $^{\circ}K$ میباشد.

فیزیکدانان موفق شده‌اند به صفر مطلق بسیار نزدیک شوند. هم اکنون به دماهائی در حدود چند هزارم درجه بالای صفر مطلق

دما را در حدود چند درجه از نقطه غلیان بالا برد، یعنی نقطه نمودار حالت سیعان را بطرف راست منحنی غلیان برد.

دمای بیش از حد غلیان یعنی پیشروی مایع به منطقه بخار، بهمین جهت دمای بیش از حد غلیان مایع را میتوان یا بادادن حرارت و یا با کاهش فشار بدست آورد.

با طریقه اخیر نتیجه شگفتی آوری بدست میآید. آب یا مایع دیگر که بادقت از گازهای محلوله آزاد شده است (این هم کار ساده ای نیست) در ظرفی ریخته میشود که پیستون آن مماس بر سطح مایع باشد. ظرف و پیستون باید از مایع خیس شوند. اکنون اگر پیستون را بطرف خود بکشیم، مایعی که با ته پیستون تماس دارد بدنبال آن کشیده میشود. ولی این قشر آب که به پیستون چسبیده است، قشر بعدی آب را بدنبال خود خواهد کشید، و آن قشر هم قشر زیرینش را، و در نتیجه مایع منبسط میشود.

سر انجام ستون آب پاره میشود (همانا ستون آب پاره میشود و نه آب، از پیستون جدا میگردد)، اما این حادثه وقتی روی میدهد که میزان نیرو بر واحد سطح به دهها کیلو گرم میرسد. بعبارت دیگر، در مایع فشار منفی معادل دهها آتمسفر بوجود میآید.

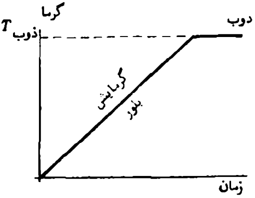
در فشارهای مثبت کوچک حالت بخاری شکل ماده پایدار است. ولی مایع را میتوان تا فشار منفی هم رساند. نمونه ای از این روشنتر برای دمای بیش از حد غلیان نمیتوان یافت.

گداز

هیچ جسم جامدی وجود ندارد که بتواند بطور نا محدود در برابر ازدیاد حرارت مقاومت کند. دیر یا زود جسم جامد مبدل به مایع میشود. البته در مواردی هم اتفاق میافتد که مانمیتوانیم به حرارت گداز برسیم، چون ممکنست تجزیه شیمیائی روی دهد.

هرچه درجه حرارت زیادتر شود، ملکولها سریعتر و سریعتر به جنبش در میآیند. سر انجام چنان لحظهای فرامیرسد که دیگر حفظ نظم بین ملکولها که باشدت «به جنبش در آمدهاند» غیر ممکن میگردد. جسم

جامد میگدازد. بالاترین دمای گداز متعلق به ولفرام است که C °۳۳۸۰ میباشد. طلا در ۱۰۶۳ و آهن در ۱۵۳۹ درجه سانتیگراد ذوب میشوند. البته فلزاتی هم هستند که درجات حرارت ذوب کمتری دارند. دمای گداز اجسام آلی زیاد نیست. نفتالین در ۸۰ درجه و تولوئن در ۹۴,۵– درجه سانتیگراد ذوب میشوند.



شکل ۱۰۱

اندازه گیری حرارت گداز اجسام، بویژه اگر دماهای گدازشان در حدود مقادیر قابل اندازه‌گیری با گرماسنج معمولی باشد کار ساده ایست. چون لزومی ندارد که پیوسته با چشم مراقب جسم ذوب شونده باشیم. کافیست به ستون جیوه گرماسنج نگاه کنیم (شکل ۱۰۱). تا وقتی که گداز آغاز نگشته است حرارت جسم افزایش میبابد. بمحض اینکه گداز شروع شد افزایش حرارت جسم متوقف میگردد و حرارت تا وقتی که جریان گداز پایان نیافته است، ثابت میماند.

همانطور که تبدیل مایع به بخار نیاز به حرارت دارد، تبدیل جسم جامد به مایع نیز مستلزم حرارت است. حرارت لازم برای این کار حرارت نامرئی گداز نامیده میشود. مثلاً ذوب یک کیلو گرم یخ معادل ۸۰ کالری بزرگ لازم دارد.

یخ از زمره اجسامی است که دارای حرارت گداز زیاد میباشند. ذوب یخ مثلاً ۱۰ بار بیشتر از ذوب همان مقدار سرب انرژی لازم دارد. بدیهیست که در اینجا منظور خود ذوب سیبا شد و دیگر این را در نظر نمیگیریم که تا آغاز ذوب سرب باید آنرا تا ۳۲۷+ درجه سانتیگراد حرارت داد. دیر ذوب شدن برف نیز به همین علت زیاد بودن حرارت گداز یخ میباشد. حالا تصور کنید که اگر حرارت گداز یخ ۱۰ بار کمتر بود چه میشد. آنوقت طغیان آبهای بهاری هر ساله چه خسارات و فلاکتهای عظیمی ببار میآورد.

گفتیم که حرارت گداز یخ زیاد است، ولی اگر آنرا با حرارت تبخیر ۵۴۰ کالری بزرگ برای یک کیلو گرم مقایسه کنیم کم است (۷

بار کمتر است). اما این اختلاف کاملاً طبیعی است. در تبدیل مایع به بخار ما باید ملکولها را یکی یکی از هم جدا کنیم. اما در گداز کافیست که ما نظم استقرار ملکولها را برهم‌زنیم و آنها را تقریبا درهمان فواصل قرار بدهیم. واضح است که حالت دوم مستلزم کار کمتری است.

وجود نقطه گداز معین نشانه مهمی برای اجسام متبلور است. همانا با این نشانه است که بسهولت میتوان آنها را از دیگر اجسام سخت که بی شکل یا شیشه ای نامیده میشوند تشخیص داد. به اینگو نه شیشه‌ها چه دربین اجسام آلی و چه معدنی برخورد میشود. شیشه پنجره معمولاً از سیلیکاتهای سدیم و پتاسیم ساخته میشود، شیشه‌هائی که روی میزهای تحریر میگذارند، اغلب شیشه‌های آلی است (آنها را پلکسی گلاس هم میگویند).

اجسام بی شکل برخلاف بلورها حرارت گداز معینی ندارند. شیشه ذوب نمیشود، بلکه نرم میگردد. یک قطعه شیشه در اثر حرارت ابتدا از سختی به نرمی میگراید و بسهولت میتوان آنرا خم کرد و یا کشید و دراز کرد. در حرارتهای بیشتر، قطعه شیشه تحت تاثیر ثقل خود تغییر شکل میدهد. بتدریج که حرارت کوره زیاد میشود، جرم غلیظ و چسبناک شیشه شکل ظرفی را که در آن قرار دارد بخود میگیرد. این جرم ابتدا به غلظت عسل است، بعد مثل خامه میشود و سر انجام بصورت مایع روانی مثل آب درمیآید. دراینجا ما بهیچوجه نمیتوانیم درجه حرارت انتقال جسم از حالت جمود به میعان را معین کنیم. علت این امر مربوط به تفاوت ریشه‌ای ساختار شیشه از ساختار اجسام متبلور است. همانطور که در بالا اشاره شد، اتم‌ها در اجسام بی‌شکل بصورت نا منظم قرار دارند. شیشه از لحاظ ساختار شبیه مایع است. در شیشه سخت ملکولها بدون نظم و ترتیب قرار دارند. یعنی افزایش حرارت شیشه فقط دامنه نوسانات ملکولهای آنرا زیاد میکند و به آنها بتدریج آزادی بیشتری برای جابجاشدن میدهد. بهمین علت نیز شیشه بتدریج نرم میشود و انتقال شدید و یکباره از «جمود» به «میعان» که مشخصه انتقال ملکولها از حالت نظم معین به بی‌نظمی میبا شد مشاهده نمیگردد.

ما وقتی از منحنی غلیان بحث میکردیم گفتیم که مایع و بخار

19—1800

میتوانند — ولو بصورت نا پایدار — در منطقه بیگانه زیست کنند. بخار را میتوان بیش از حد سرد کرد و آنرا بسوی چپ منحنی غلیان منتقل نمود و مایع را بیش از حد حرارت داد و آنرا بسمت راست این منحنی کشید.

آیا پدیده‌های نظیر در مورد بلور و مایع هم امکان دارد؟ از قرار معلوم، تشابه کامل وجود ندارد.

اگر بلور را حرارت بدهیم، در حرارت گداز شروع به ذوب شدن میکند. بالا بردن درجه حرارت بلور به بیش از نقطه ذوب آن ممکن نیست. برعکس، با سرد کردن مایع، اگر برخی تدابیر اتخاذ گردد، نسبتا بسهولت میتوان از درجه حرارت گداز «جهید». در برخی از مایعات میتوان به درجات خیلی پائینتر از نقطه انجماد دست یافت. حتی مایعاتی هستند که بسهولت میشود حرارت آنها را به درجات پائینتر از نقطه انجماد رساند، ولی به اشکال میتوان آنها را وادار به متبلور شدن نمود. این مایعات طی سرد شدن غلیظ میشوند و سر انجام سخت میگردند، ولی متبلور نمیشوند. شیشه اینطور است.

آب را هم میتوان بدرجات حرارت زیر نقطه انجماد رساند. ذرات مه میتوانند حتی در سرماهای شدید هم منجمد نشوند. اگر در مایعی که حرارت آن به زیر نقطه انجماد رسانیده شده است بلور ریزه ساده‌ای را بیاندازیم، بلا فاصله جریان بلوری شدن آغاز میگردد. بلورک باصطلاح نقش چاشنی را بازی میکند.

بالاخره در بسیاری موارد تبلور تأخیر یافته ممکنست با یک تکان یا هر حادثه تصادفی دیگر آغاز شود. مثلاً معروفست که گلیسرین متبلور نخستین بار هنگام حمل ونقل بوسیله راه‌آهن بدست آمد. شیشه پس از دیرزمانی ممکنست شروع به متبلور شدن کند (در اصطلاح فنی این حالت را «واشیسش» نامند).

بلور چگونه بوجود میآید

ما گفتیم که اکثر جامدات از بلورهای بسیار ریزی تشکیل یافته‌اند که معمولاً آنها را فقط با میکروسکپ میتوان دید. اما در طبیعت به بلورهای منفرد نسبتا بزرگی که دارای نشانه‌های ظاهری

بلور : کنارههای مسطح، لبههای مستقیم و شکل متقارن منظم میباشند خیلی بندرت برخورد میشود. این هم بیِ‌ٔعات نیست. چون اگر تدابیر ویژهای اتخاذ نگردد، هنگام سرد شدن مایع گدازه همواره اجسامی از بلورهای کوچک بوجود میآیند، نه یک بلور مجزا و منفرد. این موضوع را میتوان چنین توضیح داد که رشد بلورها در عین حال در بسیاری از نقاط گدازه آغاز میشود و بتدریج در تمام گدازه تعداد بسیار زیادی بلور میروید.

اگر بخواهیم بلور منفردی بدستآید، باید تدابیری اتخاذ کنیم که بلور از یک نقطه بروید. و اگر می بینیم که چند بلور شروع به روئیدن کرده است، باید تدابیری اتخاذ شود که شرایط رشد فقط برای یکی از آن بلورها مساعد باشد.

مثلاً برای بعمل آوردن بلورهای فلزات زودگداز فلز را در لوله شیشه ای که انتهای آن کشیده باشد ذوب میکنند. لوله را که بوسیله رشتهای درون کوره استوانهای قائم آویخته است به آرامی پائین میآورند. انتهای کشیده لوله متدرجا از کوره خارج و سرد میشود. جریان تبلور آغاز میگردد. ابتدا چند بلور بوجود میآید. اما آنهائی که بپهلو رشد میکنند به جدار لوله بر میخورند و رشدشان کند میشود. شرایط مساعد فقط برای آن بلورکی فراهم است که در طول لوله، یعنی در عمق گدازه میروید. بتدریج که لوله پائین میرود، قسمتهای تازهای از گدازه که داخل منطقه حرارتهای پائین میشوند، این بلور یگانه را «تغذیه» خواهند کرد. بدینجهت از میان همه بلورها فقط این یکی خواهد زیست و بتدریج، با پائین رفتن لوله، به رشد درطول محورش ادامه میدهد. سرانجام ، همه گدازهٔ فلز بصورت بلور واحدی منجمد میشود.

پرورش بلورهای دیرگداز یاقوت هم بر پایه همین فکر قرار دارد. گرد ریز ماده را از روی شعله آتش عبور میدهند. گردهای ریز ذوب میشوند. قطرات گدازه روی سینی دیرگدازی که سطح آن خیلی کوچک است میافتند و بلورهای زیادی تشکیل میدهند. بتدریج که قطرههای گدازه روی سینی فرو میریزد، همه بلورها رشد میکنند، ولی در اینجا هم فقط آن بلوری از میان دیگر بلورها میروید و رشد میکند که در مساعد ترین وضع برای «پذیرش» قطرههای «ریزان» قرار داشته باشد. غالب اوقات بلورها را از محلولها میرویانند. در باره اینگونه تبلور ما بعدا صحبت خواهیم کرد.

بلورهای بزرگ برای چه لازمند؟

بلورهای منفرد بزرگ درصنایع و علوم مورد نیازند. بلورهای نمک سگنت و کوارتز که واجد خاصیت عالی تبدیل عمل مکانیکی (مثلاً فشار) به شدت الکتریکی میبا شند، در کارهای فنی حائز اهمیت زیادی هستند.

صنایع اپتیک به بلورهای درشت کالسیت، نمکسنگی، فلوئوریت و دیگر بنورها نیاز دارد.

در صنایع ساعتسازی بلورهای یاقوت، سافیر و برخی دیگر سنگهای گرانبها مورد نیازاند. چون بعضی از اجزاء متحرک ساعت درهر ساعت تا ۲۰ هزار نوسان میکنند، یکچنین سرعت زیادی مستلزم آنست که موادی که نوک محورها و یاتاقانها از آن درست میشود باکیفیتی فوق‌العاده عالی باشند. اگر پایه‌ی نوک محور بقطر ۰٫۰۷ تا ۰٫۱۵ میلیمتر از یاقوت یا سافیر باشد، سائیدگی بحداقل خواهد بود. بلورهای مصنوعی این مواد خیلی محکمند و در تماس با فولاد خیلی کم سائیده میشوند. البته این کیفیت بسیار خوبست که سنگهای مصنوعی در این مورد بهتر از سنگهای طبیعی نظیرشانند.

برای فرا گرفتن خواص فلزات داشتن بلورهای درشت و منفرد آهن و مس و دیگر فلزات حائز اهمیت است.

تاثیر فشار روی دمای گداز

اگر فشار را تغییر دهیم دمای گداز نیز تغییر میکند. ما وقتی از جوشش صحبت میکردیم با یکچنین قانونمندی رو برو شدیم و دیدیم که هرچه فشار زیادتر باشد، دمای جوشش بیشتر است. این قانون برای گداز نیز صدق میکند. ولی شماره کمی مواد هستند که این قانون را نقض میکنند و دمای گداز آنها با افزایش فشار کم میشود.

میدانیم که اکثریت مطلق اجسام جامد از مایعاتشان متراکمترند. فقط همان موادی از این قاعده مستثنی هستند که دمای گداز آنها با تغییر فشار کاملاً بطور عادی تغییر نمیکند، — مثلاً آب. یخ از آب سبکتر است و دمای گداز یخ با افزایش فشار کاهش مییابد.

تراکم به افزایش فشردگی اجسام کمک میکند. اگر جسم جامد از

مایع متراکمتر است، پس تراکم به سخت شدن بیشتر آن کمک میکند و مانع ذوب آن میشود. ولی اگر عمل ذوب در نتیجه تراکم بتاخیر میافتد، یعنی جسم در درجه حرارتی که قبلا ذوب میشود، اکنون بحالت جامد باقی میماند. یعنی با افزایش فشار درجه حرارت ذوب بالا میرود. درحالت غیرعادی، مایع از جامد متراکمتر است و فشار به تشکیل مایع کمک میکند یعنی درجه حرارت ذوب (دمای گداز) را پائین میآورد.

تاثیر فشار روی دمای گداز خیلی کمتر از تاثیر فشار روی جوشش است. فشار که از ۱۰۰ $kgf/cm^۲$ تجاوز کند، دمای گدازیخ ۱ درجه سانتیگراد کاهش مییابد.

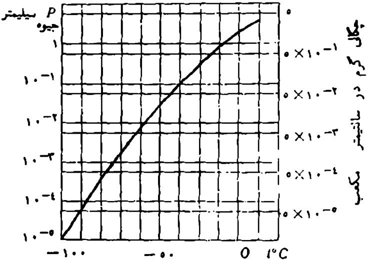
از اینجا نادرستی این توضیح که غالبا بعضیها سر خوردن سر سره پاتیناژ روی یخ را با کاهش دمای گداز در نتیجه فشار مربوط میکنند معلوم میشود. فشاری که روی تیغه سرسره وارد میآید، بهر حال از ۱۰۰ $kgf/cm^۲$ تجاوز نمیکند، و کاهش دمای گداز در نتیجه این فشار نمیتواند نقشی برای سرسره‌باز روی‌یخ ایفا کند.

تبخیر اجسام جامد

وقتی میگویند «ماده‌ای تبخیر میشود»، از این گفتار معمولاً چنین برمیآید که مایعی تبخیر میگردد. ولی اجسام جامد هم میتوانند تبخیر شوند. تبخیر اجسام جامد را گاه تصعید می‌نامند.

یکی از اجسام سختی که تبخیر میشود نفتالین است. نفتالین در ۸۰ درجه سانتیگراد ذوب میشود و در گرمای معمولی اطاق تبخیر میگردد. از این خاصیت نفتالین برای از بین بردن موریانه استفاده میشود، اگر روی پالتو پوستی نفتالین بپاشیم، در لابلای پوست بخار نفتالین جمع میشود و محیطی بوجود میآید که برای موریانه تحمل ناپذیر است.

هر جسم جامدی که بو میدهد، یعنی بمیزان قابل ملاحظه‌ای تصعید میشود. چون بو چیزی نیست بجز ملکولهائی که از ماده جدا شده و به مشام ما میرسند. ولی دربیشتر موارد، ماده بمیزان خیلی



تعادل یخ — بخار

شکل ۱۰۲

کمی تصعید میشود، بطوریکه حتی پژوهشهای دقیق هم قادر به کشف آن نیست. اصولاً هرمادهٔ جامدی (تکرار میکنیم: هر مادهٔ جامدی، حتی آهن یا مس) تبخیر میشود. اگر تصعید احساس نمیشود، این فقط بدانمعنی است که چگالی بخار حاصله خیلی ناچیز است.

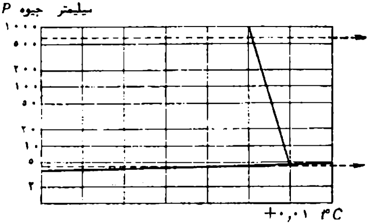
چگالی بخار اشباع شده که با جسم جامد درحالت تعادل قرار دارد، با ازدیاد درجه حرارت بسرعت افزایش مییابد (شکل ۱۰۲). بتجربه دیده شده است که برخی از مواد که در حرارت اطاق دارای بوی تند میباشند، در حرارت کم بوی خود را از دست میدهند.

چگالی بخار اشباع شدهٔ جسم جامد را در اکثر موارد نمیتوان خیلی زیاد افزایش داد، دلیل آن هم واضح است: چون ماده قبلاً ذوب خواهدشد.

یخ هم بخار میشود. به این خاصیت زنان خانه‌دار که لباسهای شسته را در سرمای یخبندان میآویزند که خشک شود، خوب واقفند. آب ابتدا یخ میبندد، بعد یخ تبخیر میگردد، و لباس خشک میشود.

نقطهٔ سه‌گانه

با این ترتیب، شرایطی هست که در آن، بخار و مایع و بلور میتوانند دو بدو درحال تعادل وجود داشته باشند.



شکل ۱۰۳

آیا کلیه حالات جسم میتوانند در حال تعادل قرار گیرند؟ چنین نقطه‌ای روی نمودار فشار — حرارت وجود دارد و آنرا نقطه سه‌گانه می خوانند. این نقطه درکجاست؟

اگر در ظرف سر بسته ای با درجه حرارت صفر آبی بریزیم که قطعه یخی در آن شناور باشد، درفضای آزاد ظرف، بخار آب (و«بخاریخ») جمع میشود. وقتی فشار به ۴٫۶ میلیمتر ستون جیوه رسید، تبخیر قطع میشود و اشباع آغاز میگردد. در این حالت، جسم در سه مرحله اش : یخ، آب، وبخار، بحال تعادل وجود دارد. و این همان نقطه سه گانه است.

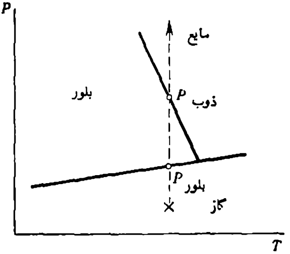
در نموداری که برای آب در شکل ۱۰۳ ترسیم گشته است، مناسبات بین حالات گوناگون با وضوح تمام نشان داده میشود.

برای هر جسمی میتوان نموداری نظیر ساخت. منحنی‌های شکل بالا را ما میشناسیم — آنها منحنی‌های تعادل بین یخ و بخار، یخ و آب، آب و بخار اند. برحسب معمول، روی محور قائم فشار و روی محور افقی حرارت برده میشود.

سه منحنی همدیگر را در نقطه سه گانه قطع و نمودار را به سه بخش تقسیم میکنند که فضاهای حیاتی یخ و آب و بخارآب میباشند.

منحنی نمودار حالت در واقع راهنمای مختصر و فشرده ایست. هدف از تهیه آن یافتن پاسخ به این سؤال است که در فشار و حرارت مفروض کدام حالت جسم ثابت و استوار است.

اگر آب یا بخار را در شرایط «بخش چپ» قرار دهیم، یخ می بندند. اگر مایع یا جسم جامدی را در «بخش پائین» گذاریم، بخار بدست



شکل ۱۰۴

میآید. در «بخش راست» بخار مایع میشود و یخ ذوب میگردد. از روی منحنی نمودار وجود مراحل، فوری میتوان دانست که اگر به جسم حرارت دهیم، یا اینکه آنرا تحت فشار قرار داده متراکم سازیم، چه خواهد شد. گرمایش با فشار ثابت در نمودار روی خط افقی نشان داده میشود. نقطه تجسمگر حالت جسم، روی این خط از چپ براست حرکت میکند.

در شکل، تصویر دو خط افقی نشان داده شده است. یکی از آنها مربوط به گرم کردن در شرایط فشار عادیست . خط مربوط به آن در بالای نقطه سه‌گانه قرار دارد. بنابر این ابتدا منحنی ذوب را و بعد، در خارج از حدود طرح، منحنی تبخیر را نیز قطع خواهد کرد. یخ در فشار معمولی در حرارت صفر درجه سانتیگراد ذوب میشود و آب حاصله در ۱۰۰ درجه سانتیگراد شروع به جوش آمدن میکند.

ولی اگر یخ در فشار خیلی پائین، مثلا کمی پائینتر از ۵۰ میلیمتر ستون جیوه حرارت داده شود، جریان بصورت دیگری در خواهد آمد.

جریان گرمایش بصورت خطی که از پائین نقطه سه‌گانه میگذرد، نمایش داده میشود. منحنی های ذوب و جوشش این خط را قطع نمیکنند. در یک‌چنین فشار ناچیز گرمایش باعث میشود که یخ مستقیما به بخار مبدل گردد.

در شکل ۱۰۴ همین نمودار نشان میدهد که اگر بخار آب در حالتی که روی شکل با صلیب مشخص شده است تحت فشار قرار گیرد،

چه پدیده‌ی جالبی روی خواهد داد. ابتدا بخار مبدل به یخ میگردد و بعد ذوب میشود. با یک نظر روی شکل میتوان بلافاصله گفت که تحت چه فشاری رشد بلور آغاز میگردد و چه وقت جریان ذوب روی خواهدداد.

نمودارهای حالت کلیه مواد بهم شبیهند. تفاوتهای زیاد، از نقطه نظر زندگی، ناشی از آنست که محل نقطه سه‌گانه در روی منحنی نمودار در مواد مختلف میتواند کاملاً متفاوت باشد.

چون ما در حدود «شرایط عادی» قرار داریم، یعنی قبل از هر چیز در فشار نزدیک به یک آتمسفر زیست میکنیم، بنابر این چگونگی استقرار نقطه سه گانه‌ی ماده نسبت به خط فشار عادی برای ما بسیار مهم است.

اگر فشار در نقطه سه‌گانه کمتر از یک آتمسفر باشد، دراینصورت برای ما که در شرایط «عادی» زیست‌میکنیم، ماده در جرگه مواد ذوب شونده قرار دارد که با افزایش حرارت ابتدا مبدل به مایع میگردد و بعد بجوش میآید. در حالت عکس، موقعی که فشار در نقطه سه‌گانه بیشتر از یک آتمسفر باشد، ضمن گرمایش، هیچگونه مایعی بدست نخواهد آمد. ماده‌ی جامد مستقیما به بخار مبدل میشود. «یخ خشک» اینطور است و از این خاصیت بستنی فروشها استفاده میکنند. در لابلای بستنیهای قالبی کاغذ پیچیده میتوان قطعات «یخ خشک» گذاشت و مطمئن بود که قالبهای بستنی تر نخواهند شد. «یخ خشک» گاز کربنیک CO_2 جامد است. نقطه سه‌گانه این ماده در فشار ۷۳ آتمسفر قرار دارد. باین‌جهت، ضمن گرمایش CO_2 جامد، نقطه‌ی نمایشگر حالت آن در طول خط افقی حرکت خواهد کرد که فقط منحنی تبخیر جسم جامد را قطع میکند (مثل یخ معمولی در فشار نزدیک به ۵ میلیمتر ستون جیوه).

اتم‌های یکسان، کریستالهای‌مختلف

گرافیت سیاه و مات رنگی که ما با آن مینویسیم و الماس شفاف و با تلالؤ و بسیار سختی که شیشه را میبرد، هر دو از اتمهای

یکسان ساخته شده‌اند — از اتمهای کربن. پس چرا خواص این دو ماده که ترکیب واحدی دارند، اینقدر متفاوتست؟

بخاطر بیاورید شبکه گرافیت مطبق را که هر اتم آن سه همسایه‌ی نزدیک دارد، و شبکه الماس را که هر اتم آن دارای چهار همسایه‌ی نزدیک است. از روی این نمونه با روشنی تمام معلوم میشود که خواص کریستالها با طرز استقرار متقابل اتمهایشان تعیین میگردد. از گرافیت بوته‌های مقاوم در برابر آتش میسازند که حرارتهای تا دو سه هزار درجه را تحمل میکنند، در صورتیکه الماس در حرارت بیش از ۷۰۰ درجه میسوزد. وزن مخصوص الماس ۳٫۵ و گرافیت ۲٫۳ است. گرافیت هادی الکتریسیته است، و الماس عایق آن... .

خاصیت ساختن کریستالهای مختلف تنها اختصاص به کربن ندارد. تقریبا هر عنصر شیمیائی، و نه فقط هر عنصر، بلکه هر ماده شیمیائی میتواند بچندین نوع و جود داشته باشد. مثلاً شش نوع یخ، نه نوع گوگرد، چهار نوع آهن موجود است.

در بحث پیرامون منحنی نمودار حالت جسم، ما از انواع گوناگون کریستالها حرفی نزدیم و حیطه‌ی واحد جسم جامد را ترسیم کردیم. در صورتی که این حیطه برای بسیاری از مواد به بخشهائی تقسیم میشود که هریک از آن‌ها با «نوع» معین جسم جامد یا باصطلاح با فاز جمود معینی (ساختار کریستالی معینی) مطابقت دارد. هر فاز کریستالی دارای حیطه‌ی حالت پایدار خود میباشد که فاصله معین و محدودی از فشارها و حرارتها را در بر میگیرد. قوانین تبدیل یک نوع کریستالی به نوع دیگر نظیر قوانین ذوب و تبخیر میباشند.

برای هر فشاری میتوان درجه حرارتی را نشان داد که در آن درجه دو نوع کریستال باسالمت همزیستی میکنند. اگر درجه حرارت را زیاد کنیم، کریستال یک نوع به کریستال نوع دوم مبدل میشود، و اگر حرارت را کم کنیم، تبدیل عکس صورت میگیرد.

برای اینکه در شرایط فشار عادی گوگرد سرخ به گوگرد زرد مبدل شود، حرارت کمتر از ۱۱۰ درجه سانتیگراد لازمست. در حرارتهای بالاتر از این درجه تا حد نقطه ذوب، ترتیب استقرار اتمها که خاص گوگرد سرخ است پایدار میماند. حرارت که کاهش یابد، نوسانات اتمها کم میشود، و از حرات ۱۱۰ درجه سانتیگراد به پا ئین، طبیعت

ترتیب مناسبتری برای استقرار اتمها میابد. تبدیل یک کریستال به‌کریستال دیگر صورت میگیرد.

برای شش نوع یخ هیچکس فکر نکرده است نامی بگذارد. آنها را یخ‌یک، یخ‌دو، یخ‌سه، ..... یخ‌هفت مینامند. ما که گفتیم شش نوع یخ هست، پس هفتمی از کجا آمده؟ موضوع در اینست که یخ چهار درآزمایشهای مکرر دیگر بدست نیامد. اگر آب را در حرارت نزدیک بصفر درجه زیر فشار قرار دهیم، در فشار حدود ۲۰۰۰ آتمسفر یخ پنج و در فشار حدود ۶۰۰۰ آتمسفر یخ شش بدست میآید.

یخ دو و یخ سه در حرارتهای زیر صفر درجه پایدارند.

یخ هفت یخ داغ است، و با فشردن و متراکم ساختن آب جوش تا فشار حدود ۲۰۰۰۰ آتمسفر بدست میآید.

همه یخها غیر ازیخ معمولی از آب سنگینترند. یخی که در شرایط خارجی عادی بدست میآید روشی غیر عادی دارد و بر عکس، یخی که در شرایطی متفاوت از شرایط عادی بدست آمده است، روششءعادیست.

گفتیم که هر ساختار کریستالی حیطه‌ی معین و ویژه‌ی موجودیت خود را دارد. ولی اگر چنین است، پس چگونه گرافیت و الماس در شرایط یکسان موجود میباشند؟

به این «بیقانونی» ها در جهان کریستالها زیاد برخورد میشود. برای کریستالها توانائی زندگی در شرایط «بیگانه» تقریبا قاعده‌ی عمومی است. در حالیکه انتقال بخار یا مایع به حیطه‌های موجودیت بیگانه مستلزم بکار بردن انواع حیل و تمهیدات است، در کریستالها برعکس، تقریبا هیچوقت نمیشود کریستالی را مجبور کرد که در حدودی که طبیعت برایش معین کرده است باقی‌بماند.

گرمایش کریستالها به درجات حرارت بالا و سرد کردن آنها به درجات پائین معلول دشواری تبدیل یک نظم به نظم دیگر در شرایط تنگنای مفرط میباشد. گوگرد زرد باید در ۹۵٫۵ درجه سانتیگراد به گوگرد سرخ مبدل شود. اگر بر سرعت جریان گرمایش کم و بیش بیفزائیم، از این نقطه‌ی تبدیل «خواهیم جهید» و به درجه حرارت ذوب گوگرد، یعنی تا ۱۱۳ درجه سانتیگراد خواهیم رسید.

درجه حرارت حقیقی تبدیل را ساده‌تر از همه میتوان درحالت تماس کریستالهای کوچک بدست آورد. اگر دو کریستال ریز گوگرد زرد

و سرخ را تنگ روی هم قرار دهیم و حرارت را به ۹۶ درجه سانتیگراد برسانیم، گوگرد سرخ گوگرد زرد را میبلعد، و در ۹۵ درجه حرارت گوگرد زرد گوگرد سرخ را خواهد بلعید. جریانهای تبدیل «کریستال به کریستال» برخلاف جریان تبدیل «کریستال به مایع» معمولاً چه در مورد تبرید زیر نقطه تبدیل و چه در حالت گرمایش بالای آن نقطه بتاخیر میانجامد.

در پارهای موارد ما در حرارتهای معین به حالاتی از ماده برخورد میکنیم که ماده مزبور میبایست در حرارتهای بکلی متفاوتی در آن حالات قرار میداشت.

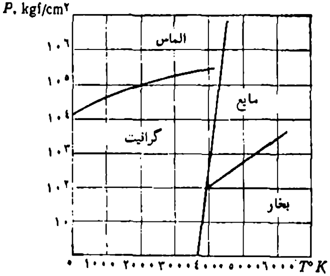
قلع سفید باید با کاهش حرارت تا ۱۳+ درجه سانتیگراد به قلع خاکستری مبدل شود. ما در زندگی معمولا با قلع سفید سروکار داریم و می بینیم که در سرمای زمستان تغییری در آن بعمل نمیآید. قلع سفید تبرید تا ۲۰—۳۰ درجه بیش از این حد را تحمل میکند ولی در زمستانهای سخت مبدل به قلع خاکستری میشود. ندانستن این واقعیت یکی از علل نابودی هیئت اعزامی اسکوت به قطب جنوب (در سال ۱۹۱۲) بود. سوخت مایعی که هیات اعزامی با خود برداشته بود در ظروفی قرار داشت که با قلع لحیم کاری شده بود. در سرمای سخت قطبی قلع سفید به گرد خاکستری رنگ مبدل گشت و در نتیجه، لحیمکاری مخازن سوخت از هم باز شد و سوخت مایع بیرون ریخت. بیهوده نیست که پیدایش لکه های خاکستری روی قلع سفید را «طاعون قلع» مینامند.

در اینجا هم مثل گوگرد، قلعسفید در حرارت کمی پائینتر از ۱۳ درجه سانتیگراد ممکنست به قلع خاکستری مبدل شود بشرط اینکه ذرهٔ ریزی از نوع خاکستری آن روی شیئی ساخته از قلع بیفتد.

وجود چند نوع مختلف از یک ماده و تاخیر در تبدیل متقابل آنها به همدیگر دارای اهمیت بزرگی در تکنیک میباشد.

در حرارت معمولی اطاق اتمهای آهن تشکیل شبکه مکعبی شکل و متمرکزی را میدهند که اتمها در رؤس و در مرکز مکعب قرار دارند. هر اتم دارای هشت همسایه است.

در حرارتهای بالا اتمهای آهن «بستهی» متراکم تری را تشکیل میدهند که هر اتم آن ۱۲ همسایه دارد. آهنی که ۸ همسایه دارد نرم است و آنکه ۱۲ همسایه دارد سخت و محکم است.



شکل ۱۰۵

بطوریکه معلوم است آهن نوع دوم را در حرارت معمولی نیز میتوان بدست آورد. این طریقه که آنرا آب دادن میگویند در متالورژی موارد استعمال گسترده‌ای دارد.

عمل آب دادن خیلی ساده انجام میگیرد – جسم فلزی را آنقدر حرارت میدهند که گداخته و قرمز شود و بعد آنرا توی آب یا روغن میاندازند. جسم چنان بسرعت سرد میشود که عمل تبدیل ساختار پایدار در حرارتهای بالا نمیتواند صورت بگیرد. بدینسان ساختار مربوط به حرارتهای زیاد مدت نامحدودی در شرایطی که خاص طبیعتش نیست وجود خواهد داشت: تبدیل کریستال به ساختار پایدار چنان بکندی صورت میگیرد که عملاً مشهود نیست.

ما در بالا از آب دادن آهن صحبت کردیم، در صورتیکه این گفته بیان کاملاً دقیق مطلب نیست. آهن را آب نمیدهند. فولاد را، یعنی آهنی را که دارای کمتر از یک در صد محتوی کربن است آب میدهند. وجود همین مقدار خیلی مختصر کربن جریان تبدیل آهن سخت به نرم را به تاخیر میاندازد و امکان آبدیدگی را فراهم میسازد. ولی آهن خالص را نمیشود آب داد، چون جریان تبدیل ساختار حتی در حالت شدید ترین تبرید فلز انجام نمی پذیرد.

بر حسب نوع نمودار حالت، با تغییر فشار و حرارت تبدیلهای معین را انجام میدهند. بسیاری تبدیلهای کریستال به کریستال فقط با تغییر یک عامل فشار صورت میگیرند. مثلاً فسفرسیاه از این طریق بدست آمده است.

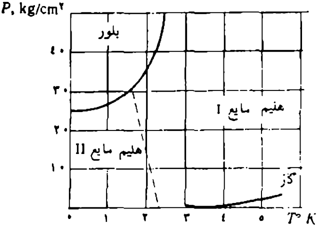
تبدیل گرافیت به الماس فقط با استفا ده همزمان از حرارت حیلی بالا و فشار بسیار زیاد صورت پذیر گشته است. در شکل ۱۰۵ نمودار حالت کربن نشان داده شده است. در فشارهای زیر ده هزار آتمسفر و حرارتهای کمتر از $4000\ ^{\circ}K$ حالت پایدار، گرافیت است. باین ترتیب، الماس در شرایط «بیگانه» زیست میکند و بنابراین آنرا میتوان بدون زحمت خاصی به گرافیت مبدل کرد. ولی تبدیل عکس آن دارای اهمیت عملی است. تبدیل گرافیت به الماس تنها بایک افزایش فشار عملی نیست. تبدیل فازها در حالت جمود بطوریکه معلومست بسیار کند صورت میگیرد. شکل نمودار حالت، راه حل صحیح را بدست میدهد: افزایش فشار همزمان باگرمایش. در این صورت ما کربن مذاب بدست خواهیم آورد (زاویه‌ی سمت راست نمودار). با سرد کردن آن در فشار زیاد، ما باید به حیطه‌ی الماس دست یابیم.

امکان عملی چنین جریانی در سال ۱۹۵۵ اثبات شد، و در حال حاضر مسأله از لحاظ فنی حل شده محسوب میشود.

مایع عجیب

اگر درجه حرارت جسمی را پا ئین بیاوریم، آن جسم دیر یا زود سخت خواهد شد و ساختار کر یستالی کسب خواهدکرد. در جریان مزبور این مساله که سرد شدن جسم تحت چه فشاری صورت میگیرد، تاثیری ندارد. این حالت از نقطه نظر قوانین فیزیک که ما تاکنون به آنها آشنائی یا فته ایم، کاملا طبیعی بنظر میرسد و مفهوم است. چون در واقع وقتی ما حرارت را کم میکنیم، شدت حرکت دمائی را پائین میاوریم. وقتی حرکت ملکولها آنقدر ضعیف میشود که دیگر نمی تواند روی نیروهای تاثیر متقابل بین آنها موثر باشد، ملکولها با نظم و تر تیب دقیقی گرد هم میآیند. با ادامه جریان تبرید، تمام انرژی حرکت ملکولها از آنها گرفته میشود، و در صفر مطلق، ماده باید بصورت ملکولهای ساکن که در شبکه صحیح و منظمی قرار گرفته اند وجود داشته باشد. تجربه نشان میدهد که کلیه مواد پیرو چنین قاعده‌ای هستند. فقط یک ماده منحصر بفرد از این قاعده مستثنی است. این ماده‌ی «ناجور» هلیوم است.

باره هلیوم تا کنون مطالبی چند به اطلاع خوانندگان گرامی
هلیوم از لحاظ درجه حرارت بحرانیش رکورد را شکسته
یچ ماده‌ای نیست که درجه حرارت بحرانیش از ۴٫۳°K
ند. ولی این رکورد بخودی خود هیچ مایه تعجب نیست.
ر اینست که اگر هلیوم را به درجات پائینتر از درجه حرارت
رد کنیم و عملاً به صفر مطلق هم برسیم، هلیوم جامد بدست
آورد. هلیوم در صفر مطلق هم بحالت مایع باقی خواهد ماند.
لت هلیوم از نقطه نظر قوانین حرکت که ما شرح دادیم
ه قابل توضیح نیست و یکی از نشانه‌های محدودیت حیطه‌ی
قوانین است که قوانین‌عام بنظر میرسیدند.
سم مایع باشد، اتمهای آن در حرکتند. ولی وقتی ما جسمی
ر مطلق سرد میکنیم، یعنی تمام انرژی حرکت را از آن
. از اینجا چنین برمیآید که بگوئیم هلیوم دارای چنان انرژی
ست که نمیتواند از آن جدا شود. این لتیجه‌گیری با اصول
که ما تاکنون دیده‌ایم نا موافق است. بموجب قوانین مکانیک
ی ما، حرکت جسم را همیشه میتوان با گرفتن همه انرژی
ن، تا توقف کامل ترمز کرد. همچنین میتوان با گرفتن انرژی
در برخورد شان بدیواره های ظرف در حال سرد شدن، از
ها جلوگیری نمود. این قوانین مکانیک در مورد هلیوم اصلاً
کنند.
اصیت «عجیب» هلیوم نمایشگر واقعیتی با اهمیت شگرف است.
، بار با عدم امکان بکار بردن قوانین اساسی مکانیک در جهان
نینی که از بررسی مستقیم حرکت اجسام مرئی معین گشته‌اند،
که بنیاد تزلزل نا پذیر فیزیک محسوب میشدند، بر خورد
این واقعیت را که هلیوم در صفرمطلق از کریستالی شدن
ورزد، بهیچ ترتیبی نمیتوان با مکانیکی که ما تاکنون فرا گرفته ایم
خت. تضادی که ما نخستین‌بار با آن مصادف شده ایم، یعنی
ی جهان اتمها از قوانین مکانیک، فقط حلقه‌ی نخست از
ماد های حادتر و شدیدتر در فیزیک است.
ضادها ضرورت تجدید نظر در اصول و مبانی مکانیک جهان
بمیان میآورد. این تجدید نظر خیلی عمیق است و به تغییر
ک ما از طبیعت منجر میشود.



شکل ۱۰۶

ضرورت تجدید نظر ریشه ای در مکانیک جهان اتمی به این معنی نیست که باید روی قوانین موجود مکانیک که ما آنها را فرا گرفته ایم خط بطلان کشیده شود. صحیح نیست اگر ما خواننده را وادار کنیم چیزهائی را که لازم نیست فرا گیرد. مکانیک قدیمی برای جهان اجسام بزرگ کاملاً صحیح است. همین کافیست که ما به فصول مربوط در فیزیک بادیده احترام عمیق بنگریم. ولی این نکته نیز مهم است که برخی از قوانین مکانیک «قدیم» بدون تغییر به مکانیک «نو» انتقال مییابند. قانون بقاء انرژی از جمله این قوانین است.

خاصیت عدم امکان گرفته شدن انرژی در صفر مطلق تنها از خواص هلیوم نیست. بقرار معلوم انرژی «صفر مطلق» در همه مواد وجود دارد. منتها فقط در هلیوم است که این انرژی برای ممانعت از اینکه اتمها شبکهٔ کریستالی صحیحی تشکیل دهند، کافی میباشد.

نباید تصور کرد که هلیوم نمیتواند بصورت کریستال درآید. برای کریستالی کردن هلیوم فقط باید فشار را تقریباً تا ۲۵ آتمسفر بالا برد. سردکنی در بالای این فشار به تشکیل هلیوم کریستال سخت با خواص کاملاً معمولی منجر میشود. هلیوم شبکه‌ی متمرکز مکعبی تشکیل میدهد.

در شکل ۱۰۶ نمودار حالت هلیوم نشان داده شده است. تفاوت شدید این دیاگرام با دیاگرامهای کلیه مواد دیگر در فقدان نقطه سه‌گانه است. منحنی‌های ذوب وجوشش همدیگر را قطع نمیکنند.

محلولها

محلول چیست

اگر در آبگوشت نمک بریزیم و آنراهم بزنیم اثری از نمک برجای نمی ماند. نباید تصور کرد که ذرات کوچک نمک با چشم نا مجهز قابل رویت نیستند. کر یستالهای کوچک نمک با هیچ وسیله ای قابل رؤیت نخواهند بود، چون حل شده‌اند. اگر در آبگوشت فلفل بریزیم محلول درست نمیشود. حتی اگر چند شبانه روز آبگوشت را هم بزنیم، ذرات خرد و سیاه فلفل ناپدید نخواهند شد.

ببینیم وقتی میگوئیم: «ماده‌ای حل شد» یعنی چه؟ مگر آتمها یا ملکولهای آن میتوانند بدون اثر غیب شوند؟ البته نه، آنها غیبشان نمیزند. ضمن حل شدن، تنها دانه های کوچک، کریستالها و تجمع ملکولهای هم نوع محو میشود. حل شدن عبارت از آنگونه درهم آمیختن اجزاء مخلوط است که در جریان آن ملکولهای ماده‌ای بین ملکولهای ماده‌دیگر پخش میشوند. محلول، یعنی درهم‌آمیزی ملکولها و آتمهای مواد مختلف.

محلول میتواند محتوی مقادیر مختلفی از ماده حل شده باشد. ترکیب محلول بوسیله غلظت آن مشخص میشود، مثلاً بوسیله نسبت مقدار ماده حل شده برحسب گرم به مقدار محلول برحسب لیتر.

با اضافه کردن ماده حل شونده به محلول غلظت آن بالا میرود، ولی این کار تا بینهایت ادامه نمییابد. دیر یا زود محلول اشباع شده و از «پذیرش» ماده حل شونده سر باز خواهد زد. غلظت محلول اشباع شده یعنی غلظت «نهائی» آنرا قابلیت انحلال مینامند.

در آب داغ قند بخوبی حل میشود. یک استکان که از آب ۸۰ درجه حرارت پر شده باشد میتواند ۷۲۰ گرم قند را بدون رسوب در خود حل کند. این محلول اشباع شده غلیظ و چسبنده است و آنرا شربت مینامند. رقم‌فوق‌الذکر برای لیوان تراش‌دار بود که حجم آن ۰٫۲ لیتر میباشد. این بدانمعنی است که غلظت شکر در آب ۸۰ درجه حرارت برابر ۳۶۰۰ g/l است (خوانده میشود «گرم در لیتر»).

قابلیت انحلال برخی مواد وابستگی شدیدی بگرما دارد. در حرارت معمولی اطاق (۲۰°C) حلالیت شکر در آب تا ۲۰۰۰ g/l تنزل میکند. درصورتیکه حلالیت نمک با تغییر گرما خیلی کم دگرگون میشود. نمک و شکر خوب در آب حل میشوند در صورتیکه مثلاً نفتالین عملا در آب قابل حل نیست. مواد مختلف در حلالهای گوناگون بطور کاملا متفاوتی حل میشوند.

از محلولها برای رویاندن مونوکریستالها (تک بلورها) استفاده میشود. اگر بلوری خرد از ماده‌ای را در محلول اشباع شده همان ماده بیاویزیم بتدریج که ماده حلال تبخیر میشود، مادهٔ حل شده بر سطح بلور مینشیند. در این جریان، ملکولها کاملاً ترتیب را رعایت خواهند کرد و نتیجتاً بلورخرد بدون از دست دادن حالت تک‌بلوری به بلور بزرگ مبدل خواهد شد.

محلول های مایعات‌وگازها

آیا میشود مایع را در مایع حل کرد؟ بدیهی است‌که میشود. مثلاً ودکا محلول الکل در آب است (یا محلول آب در الکل — بسته به اینکه کدامیک از آنها بیشتر باشد). ودکا محلولی است واقعی که در آن ملکولهای الکل و آب کاملاً درهم آمیخته اند.

اما همیشه ضمن اختلاط دو مایع چنین نتیجه ای حاصل نمیشود.

آزمایش کنید توی آب نفت‌سفید بریزید. هراندازه هم آنها را هم بزنید محلول همگون بدست نمیآید. در اینجا هم هرگونه تلاشی مثل

تلاش برای حل فلفل در آبگوشت بی نتیجه خواهدبود. همین که بر هم زدن محلول را قطع کنیم، دو مایع بصورت دو قشر جدا از هم در خواهند آمد: آب که سنگین‌تر است در زیر و نفت سفید که سبک‌تر است روی آن قرار خواهد گرفت. نفت‌سفید با آب و الکل با آب از لحاظ حلالیت دو سیستم کاملاً متقا بلند.

اما حالت‌های بینابینی نیز موجود است. اگر اتر را با آب بیا میزیم در ظرف دو قشر مشخص دیده خواهد شد. در اولین نظر ممکن است چنین تصور شود که قشر بالائی اتر است و قشر زیری — آب. ولی در واقع هم در بالا و هم در پائین ما بامحلول سروکار داریم. در پا ئین آبی است که در آن قسمتی از اتر حل شده (با غلظت ۲۵ گرم اتر در یک لیتر آب) و در بالا اتری است که مقدار قابل ملاحظه‌ای آب درخود حل کرده است (g/l ۶۰).

اکنون به محلول گازها میپردازیم. روشن است که همه گازها با مقادیر نامحدود در یکدیگر حل میشوند. دو گاز همیشه طوری با هم آمیخته میگردند که ملکولهای یکی بین مولکو لهای دیگری نفوذ میکنند. چون ملکولهای گاز ها بطور کلی بر روی هم کم تاثیر ند و هر گازی در جوار گاز دیگر طوری عمل میکند که گوئی به وجود گاز همجوارش بمفهوم معینی «بی توجه» است.

گاز ها ممکن است در مایعات نیز حل شوند، ولی نه بمقادیر دلخواه بلکه بمیزان محدود، و از این لحاظ آنها با مواد جامد تفاو تی ندارند. ضمناً قابلیت حل گازهای مختلف خیلی متفاوتست و این تفاوت ممکن است خیلی هم زیاد باشد. در آب میتوان مقادیر عظیمی آمونیاک (در نیم استکان آب حدود ۱۰۰ گرم)، هیدروژن سولفوره وانیدریدکربنیک را حل کرد. اکسیژن و آزت بمیزان خیلی کمی در آب قابل حلند (۰,۰۷ و ۰,۰۳ گرم دریک لیتر آب سرد). بدین ترتیب در یک لیتر آب سرد، فقط در حدود یک‌صدم گرم هوا وجود دارد. اما همین مقدار ناچیز برای زندگی در روی زمین دارای نقشی بزرگ است، چون ماهیها از اکسیژن محلول در آب استنشاق میکنند.

هر قدر فشار گاز بیشتر باشد مقدار بیشتری از آن در مایع حل میشود. اگر مقدار گاز محلول خیلی زیاد نباشد، در اینصورت بین آن و فشار گاز وارد بر سطح مایع تناسب مستقیم موجود است.

آب گاز دار سرد مشروب لذتبخشی است که عطش را بخوبی رفع میکند.

بعلت وجود همین رابطه بین مقدار گاز محلول با فشار است که میتوان آب را گازدار کرد. انیدرید کربنیک را با فشار وارد آب میکنند (گاز از بالنهائی که در هر کیوسک آب فروشی هست وارد آب میشود). موقع ریختن آب در لیوان فشار تامیزان فشارجو پائین میاید و گاز زائد بصورت حبابها از آب خارج میشود.

با در نظر گرفتن این تاثیر، غواصان را نباید بسرعت از توی آب بالا کشید. چون تحت فشار موجود در ژرفای آب در خون غواص مقداری هوای اضا فی حل میشود. در موقع بالا آمدن بعلت تنزل فشار، هوا بصورت حبابهائی خارج میشود و ممکن است جلو جریان خون در رگها را بگیرد.

محلولهای جامد

برحسب معمول واژه محلول را برای مایعات بکار می‌برند، اما مخلوطهای جامدی نیز وجود دارند که اتم‌ها و یا ملکولهایشان بصورتی همگون با هم در آمیخته‌اند. چگو نه میتوان محلول جامد بدست آورد؟ این کار با کوبیدن مواد در هاون مقدور نیست. بنابراین مواد آمیز نده را باید ابتدا بمایع تبدیل نمود، یعنی آبشان کرد و بعد آنها را در حالت مایع در هم آمیخت و مخلوط را بحالت جامد در آورد. بشکل دیگری نیز میتوان عمل کرد، یعنی دو ماده مخلوط کردنی را در مایعی حل نمود و پس از آن به تبخیر مایع حلال پرداخت. با این شیوه ها محلولات جامد میتوانند بدست آیند. گفتیم میتوانند بدست بیایند، ولی معمولاً بدست نمی آیند. محلولات جامد بسیار کم یابند. اگر تکه قندی را در آب شور بیاندازیم، قند بخوبی حل میشود، و اگر آب تبخیر شود، در ته فنجان کریستالهای بسیار ریزقند و نمک پدیدار میگردند. قند و نمک محلول جامد بدست نمید هند.

میتوان کادمیم و بیسموت را در یک بوته ذوب کرد. پس از سرد شدن زیر میکروسکپ مخلوطی از کریستالهای کادمیم و بیسموت مشاهده خواهیم کرد. بیسموت و کادمیم نیز محلول‌های جامد بوجود نمی آورند.

ولی ناکافی برای پیدایش محلول جامد عبارتست از
ها و اتم‌های مواد آمیزنده از لحاظ شکل و اندازه. در
ن از انجماد مخلوط کریستالهای همگون بوجود میآیند.
شبکه هر کریستال اتمهای (ملکولهای) انواع مختلف
نا منظمی جایگزین میشوند.

فلزات که در تکنیک از اهمیت زیادی برخوردارند،
های جامد میباشند. با حل کردن مقدار کمی آمیزه در
ان خواص فلز را بشدت تغییر داد. نمونه روشن این امر
که یکی از پرمصرف‌ترین مواد در تکنیک میباشد. فولاد
ی است مرکب از مقادیر کمی. کربن — در حدود
وزن — و آهن (یک اتم کربن درمقابل ٤ اتم آهن).
بطور نا منظم بین اتمهای آهن پخش شده‌اند.

فقط تعداد قلیلی اتم کربن حل میشود. اما محلولهای
. که در آنها آمیزش مواد بهرنسبت دلخواهی امکان پذیر
مثال میتوان آلیاژ طلا و مس را برشمرد. کریستالهای
ای شبکه های همگونی هستند بشکل مکعبهائی که اتمها
رئوس آنها بلکه در وسط سطوحشان نیز قرار گرفته اند.
ی نیز دارای چنین شبکه ای است. تصور ساختار آلیاژ
ۀ مس را میتوان با خارج کردن فرضی اتمهای طلا از شبکه
ساختن آن با اتمهای مس بدست آورد. ضمنا این تعویض با
م میگیرد. آتمهای مس بطور کاملاً تصادفی درگره‌های شبکه
. آلیاژ های مس و طلا را میتوان محلول جانشینی نامید،
لاد محلولی از نوع دیگر است — محلول رسوخی است.
کثریت قریب به اتفاق موارد محلول جامد بوجود نمیآید
بالا گفته شد، پس از انجماد، در زیر میکروسکپ دیده
مخلوط از کریستالهای ریز هر دو ماده ترکیب

چگونه محلولها منجمد میشوند

ل ملحی در آب را سرد کنیم، مشاهده میشود که دمای
کاهش مییابد. درجه گرما از صفر نیز پا ئین تر

رفته ولی انجماد صورت نمیگیرد. وقتیکه گرما بچند درجه زیر صفر رسید، در مایع بلورکهای ریزی پدیدار میشوند. اینها بلورکهای یخ خالص هستند. در یخ نمک حل نمیشود.

دمای انجماد بسته به غلظت محلول است. افزایش غلظت محلول باعث کاهش دمای انجماد آن میشود. کمترین دمای انجماد به محلول اشباع شده تعلق دارد. میزان کاهش دمای انجماد آنقدر هم کم نیست: مثلا، محلول اشباع شده نمک طعام در آب در حرارت ۲۱ — درجه سانتیگراد یخ میبندد. بکمک املاح دیگر کاهش باز هم بیشتری را میتوان باعث شد. از جمله مثلاً کلرات کلسیم امکان تنزل دمای انجماد تا ۵۵ — درجه سانتیگراد را فراهم میسازد.

اینک ببینیم جریان انجماد چگونه انجام میگیرد. پس از پیدایش اولین بلورکهای یخ غلظت محلول بالا میرود. در این حالت شماره نسبی ملکولهای بیگانه افزایش مییابد و همراه با آن بر موانع جریان تبلور آب نیز افزوده میشود و دمای انجماد کاهش مییابد. اگر درجه حرارت پائین آورده نشود تبلور متوقف میگردد. ضمن کاهش باز هم بیشتر درجه گرما بلورکهای آب (حلال) به مجزا شدن خود ادامه میدهند. بالاخره محلول اشباع میشود. از این پس دیگر نمیتوان محلول را با مقدار بیشتر ماده حل شونده غنی کرد و محلول یک مرتبه منجمد میشود. اگر مخلوط منجمد شده را زیر میکرو سکوپ قرار دهیم میتوانیم مشاهده کنیم که مخلوط از بلورکهای یخ و نمک ترکیب یافته است. بدینسان محلول ما نند مایع ساده منجمد نمیشود. جریان انجماد در فاصله حرارتی بزرگی بطول میانجامد.

اگر بر سطح یخ زده‌ای نمک پاشیده شود چه خواهد شد؟ جواب این سئوال را رفتگرها خوب میدانند: همینکه نمک با یخ تماس پیدا کرد یخ شروع به آب شدن میکند. برای اینکه این پدیده رخ دهد، البته لازمست که دمای انجماد محلول اشباع شده نمک پائین تر از درجه حرارت هوا باشد. اگر این شرط فراهم با شد، پس مخلوط یخ و نمک در وضع دیگری — در حالت وجود محلول بطور ثابت قرار دارد. بنابراین مخلوط یخ و نمک به محلول تبدیل خواهد شد، یعنی یخ آب میشود و نمک در یخ آب شده حل میگردد. بالاخره یا تمام یخ آب میشود و یا محلول دارای آنچنان غلظتی میشود که دمای انجماد آن مساوی حرارت محیط است.

حیاطی بمساحت ۱۰۰ متر مربع از یخی بضخامت یک سانتیمتر پوشیده شده است. این مقدار کمی نیست و وزنش در حدود یک تن میشود. به بینیم برای پاک ساختن حیاط از یخ چقدر نمک لازم است، اگر حرارت هوا $-3^\circ C$ باشد. چنین دمای تبلوری (ذوبان) را محلول نمکی داراست که غلظت آن 45 g/l باشد. تقریبا 1 l (یک‌لیتر) آب معادل یک کیلوگرم یخ است. پس برای ذوب یک تن یخ در حرارت $-3^\circ C$، ۴۵ کیلوگرم نمک لازم است. در عمل مقدار بسیار کمتری بکار برده میشود چون مقصود ذوب کامل یخها نیست.

ضمن اختلاط یخ با نمک یخ آب میشود و نمک در آب حل میگردد. اما برای ذوب شدن یخ حرارت لازم است و یخ این حرارت را از محیط اطراف خود اخذ میکند. بدین ترتیب افزودن نمک به یخ موجب کاهش در جه گرما میشود.

حالا ما دیگر عادت کرده‌ایم بستنی فابریکی بخریم. سابقاً بستنی را در خانه تهیه میکرد ند و برای اینکار مخلوط یخ و نمک نقش یخچال را داشت.

جوشش محلولها

پدیده‌های جوشش و انجماد محلولها دارای جنبه‌های مشترک بسیاری میباشند.

وجود ماده محلول تبلور را دشوار میسازد. بهمان دلائل ماده محلول جوشش را نیزمشکل میسازد. در هر دو مورد، ملکولهای بیگانه مثل اینکه برای حفظ رقت هرچه بیشتر محلول مبارزه میکنند. بعبارت دیگر ملکولهای بیگانه وضع ماده اصلی را تثبیت مینمایند. (یعنی ادامه وجود آن‌را تسهیل میکنند).

ازاینرو ملکولهای بیگانه در راه تبلور مایع مانع ایجاد میکنند که منجر به پائین افتادن دمای تبلور میشود. درست همین طور این ملکولها مزاحم جوشش مایع هستند، یعنی دمای جوشش آنرا بالا میبرند.

این نکته جالب است که تا حدود معینی از غلظت (برای محلولهای نه چندان غلیظ)، چه پائین آمدن دمای تباور و چه بالارفتن دمای جوشش بهیچوجه با خواص ماده حل شونده بستگی ندارد و تنها با تعداد ملکولهای آن مربوط است.

این خاصیت برای تعیین وزن ملکولی ماده حل شونده مورد استفاده قرار میگیرد. اینکار توسط فرمول قابل توجهی (دراینجا شرح آن مقدور نیست) که رابطه بین دگرگونی دمای انجماد و یا جوشش را با تعداد ملکولها در واحد حجم محلول و نیزبا گرمای ذوب یا جوشش معین میکند، صورت میگیرد.

میزان افزایش دمای جوشش آب قریب سه بار کمتر از کاهش دمای انجماد آن است. مثلاً آب دریا که نزدیک ۳٫۵ در صد نمک دارد نقطه جوشش آن ۱۰۰٫۶°C میباشد، در حالیکه دمای انجمادش تا ۲ °C پائین‌میآید.

اگر مایعی در حرارت بالاتری ازمایع دیگر بجوشد، در درجه گرمای یکسان فشار بخار آن کمتر است. بنابراین فشار بخار محلول کمتراز فشار بخار خود ماده حل‌کننده است. در باره تفاوت آنها از روی ارقام‌زیر میتوان قضاوت کرد: فشار بخار آب در حرارت ۲۰°C برابر ۱۷٫۵ mm Hg است، در حالیکه فشار بخار محلول اشباع شده‌ی نمک طعام در همین حرارت ۱۳٫۲ mm Hg میباشد.

بخار دارای کشسانی ۱۵ mm Hg که برای آب، اشباع نشده است، در مورد محلول اشباع شده نمک فوق اشباع شده محسوب میشود. در جوار چنین محلولی بخار شروع به میعان کرده و به محلول میپیوندد. بدیهی است که بخار آب هوا را نه فقط محلول‌نمک، بلکه گرد نمک نیز جذب میکند، چون اولین قطره آبی که روی نمک میافتد آنرا حل ساخته و بمحلول اشباع شده تبدیل میکند. جذب بخار آب از هوا همیشه باعث نمناک شدن نمک میشود. زنهای خانه دار با این پدیده خوب آشنا هستند و از آن دلخور اند. اما این پدیده افت کشسانی بخار بر روی محلول در بعضی موارد مفید است و از آن برای خشک کردن‌هوا در کارهای آزمایشگاهی استفاده میشود. هوا را از روی کلرات کلسیم که از لحاظ جذب رطوبت همه رکوردهارا شکسته است عبور میدهند. اگر فشار بخار در محلول اشباع شده نمک

طعام ۱۲,۲ mm Hg است، در کلرات کلسیم برابر ۰,۶ mm Hg میبا شد. اگر بخار آب از روی مقدار کافی کلرات کلسیم (یک کیلوگرم آن تقریباً یک کیلوگرم آبرا در خود «جای میدهد») عبور داده شود، کشسانی آن تا همین مقدار پائین میآید.
این مقدار رطوبت در هوا بسیار ناچیز است و عملاً میتوان هوا را خشک شمرد.

چگونه مایع را ازآمیزه ها پاک میکنند

یکی از مهمترین شیوه های پاک کردن مایعات از آمیزه‌ها تقطیر است. مایع را میجوشانند و بخار را راهی مبرد میکنند. بخار ضمن سرد شدن از نو به مایع تبدیل میشود، اما این مایع پاکتر از مایع اولی است.
بکمک تقطیر میتوان سادگی از مواد جامد محلول در مایع رهائی یافت. ملکولهای چنین موادی عملاً در بخار وجود ندارند. آب مقطر کاملاً بی‌طعم و پاک که فاقد هرگونه آمیزه معدنی است از همین راه بدست میآید.
با استفاده از تبخیر میتوان از آمیزه‌های مایع نیز رهائی یافت و مخلوط مرکب از دو ویا چند مایع را ازهم جدا ساخت. برای اینکار از اینکه دو مایع مخلوط یک اندازه «آسان» نمی‌جوشند استفاده میشود.
ببینیم ضمن جوشش مخلوطی از دو مایع، مثلاً آب و الکل اتیلیک به نسبت مساوی (ودکای ۵۰ درجه‌ای) چه روی خواهد داد.
تحت فشار معمولی، آب در حرارت ۱۰۰°C و الکل در حرارت ۷۸°C میجوشند. مخلوط مورد بحث در حرارتی بینا بینی مساوی ۸۱,۲°C بجوش میآید. الکل آسانتر میجوشد و بدین جهت فشار بخار آن بیشتر است و با ترکیب اولیه ۵۰ درصد مخلوط اولین بخش بخار شامل ۸۰ در صد الکل خواهد بود.
بخار دریافتی‌را میتوان روانه مبرد ساخت و آنرا تبدیل به مایع باعیار الکل غنی نمود. این جریان را میتوان تکرار کرد. اما روشن است که در عمل بکار بردن چنین شیوه‌ای بدرد نمیخورد، چون پس

از هر تقطیر مقدار ماده کمتری بدست خواهدآمد. برای احتراز از این ضایعات از برجهای برخه‌گر (یعنی پالایش از طریق تقطیر جزء بجزء) استفاده میشود.

اصل ساختمان این دستگاه جالب را شرح میدهیم. برج قائمی را در نظر بگیرید که در قسمت پائین آن مخلوط مایع قرار گرفته است. برج را از زیر گرم و از بالا سرد میکنند. بخاری که ضمن جوشش ایجاد میشود بالا رفته و بحالت میعان در میآید و مایع تشکیل یافته به پائین جریان مییابد. در صورت ثابت‌ماندن میزان گرمائی که به پائین برج رسانده میشود و حرارتی که از بالای آن اخذمیگردد، در برج مسدود جریانهای متلاقی بخار متصاعد به بالا و مایع روان بسوی پائین بوجود میآید.

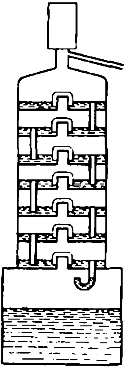
توجه خود را به یکی از مقاطع افقی برج معطوف میداریم. از این مقطع مایع بسوی پائین روان است و بخار بطرف بالا، و ضمناً هیچیک از مواد مرکبه مخلوط مایع متوقف نمیشود. اگر برج حاوی مخلوط الکل و آب باشد، مقدار الکلی که بالا و پائین میرود همانند مقدار آبی که بالا و پائین میرود باهم برابر خواهند بود. چون مایع پائین میآید و بخار بالا میرود در نتیجه در هر ارتفاع برج ترکیب بخار و مایع یکسان است.

بطوریکه هم اکنون معلوم شد، موازنه مایع و بخار مخلوط دو ماده مستلزم عکس قضیه یعنی متفاوت بودن ترکیب فازهای مایع و بخار است. لذا در تمام ارتفاعات برج تبدیل متقابل مایع به بخار و بخار به مایع در جریان است. دراین جریان بخش دیر جوش مخلوط بحالت میعان در میآید وبخش زود جوش آن از مایع به بخار تبدیل میشود.

بدین جهت جریان بخار ضمن حرکت خود ببالا مثل اینکه بخش زود جوش را از همه ارتفاعات جمع میکند و جریان پائین رونده مایع از بخش دیر جوش غنی میشود. ترکیب مخلوط در ارتفاعات مختلف متفاوت خواهد بود. هر چه فراتر رویم نسبت درصد بخش زود جوش افزایش مییابد. درحالت ایده‌آل در بالای برج لایه‌ای از ماده‌خالص زود جوش و در ته برج قشری از ماده خالص دیر جوش وجود خواهد داشت.

حالا لازم است که حتی المقدور آهسته، برای آنکه منظره ایده‌آلی که تر سیم شد نقض نشود، ماده سبک جوش‌را از فراز برج و سخت‌جوش‌را از پائین آن خارج کرد.

برای اینکه عمل جدا ساختن یا پالایش عملاً صورت گیرد، باید به جریانات متلاقی بخار و مایع فرصت داده شود تا آنطور که باید در هم بیامیزند. برای این منظور بکمک سینی‌هائی که در فواصل معین در ارتفاع برج بالای یکدیگر قرار گرفته‌اند و بوسیله مجراهائی بهم مرتبط میباشند از سرعت جریانات مایع و بخار کاسته میشود. مایع از هرسینی فوقانی پس از لبریز شدن به سینی پائین‌تر جریان مییابد. بخار که با جریانی سریع (۰٫۳ تا ۱ متر درثانیه) بسوی بالا در حرکت است از لایه نازک مایع رسوخ کرده و راه خود را باز میکند. شمای برج در شکل ۱۰۷ نشان داده شده است.



شکل ۱۰۷

همیشه نمیتوان به پالایش کامل مایع دست یافت. برخی از مخلوطها دارای خاصیتی «ناخوش آیند» هستند. بدینمعنی که درترکیب معینی از مخلوط، نسبت ملکولهای تبخیر شونده ماده مرکبه با نسبت آن در مایع مخلوط یکسان است. دراین مورد بدیهی است که پالایش بشیوه مذکور نا ممکن میشود. مخلوط ۹۶% الکل و ۴% آب از اینجمله است. این مخلوط بخاری با همین ترکیب میدهد. بدین جهت الکل ۹۶ درجه بهترین الکلی است که از راه تبخیر میتوان بدست آورد.

پالایش (یاتقطیر) مایعات مهمترین جریان در تکنولوژی شیمیائی است. مثلاً بوسیلهٔ پالایش از نفت بنزین بدست میآورند.

این نکته جالب است که پالایش ارزان‌ترین شیوه دریافت اکسیژن میباشد. بدیهی است که برای اینکار ابتدا باید هوا را بحالت میعان در آورد تا بعد از آن بتوان از راه پالایش ازت واکسیژن تقریبا تمیز را از مایع جدا کرد.

در اتحاد شوروی معمولاً بر روی شیشه‌های حاوی مواد شیمیائی پهلوی اسامی شیمیائی آنها حروف روسی «چ» «چ. د. آ.» یا «سپ. چ.» ثبت شده است. این حروف نمایشگر درجه پاکی ماده است: «چ» بیانگر درجه نازل پاکی است. دراین حالت ماده حدود ۱٪ آمیزه دارد. «چ. د. آ.» یعنی «پاک برای آنالیز» در این حالت مقدار آمیزه از چند دهم درصد تجاوز نمیکند. «سپ. چ.» بمعنی ماده پاک برای آنالیز طیفی است و آنرا بآسانی نمیتوان بدست آورد. آنالیز طیفی آمیزه یک درچند هزاری‌را آشکار میسازد. برچسب «سپ. چ.» بیانگر آنست که ماده از لحاظ درجه خلوص، لااقل با «چهار ۹» مشخص میشود، یعنی سهم ماده اصلی لااقل ۹۹,۹۹ درصد است.

مواد جامد خالص موارد مصرف خیلی زیادی دارند. برای بسیاری از خواص فیزیکی آمیزه یک‌هزارم درصد نیز زیانبخش است. در یکی از مسائل فوق‌العاده جالب برای تکنیک امروزی یعنی بدست آوردن مواد نیمه رسانا، بنابر مطالبات فنی، آمیزه نباید بیش از یک ده میلیونیم باشد. در این وضع یک اتم غیر لازم بین ده ملیون اتم لازم مانع حل مسئله فنی محسوب میشود! برای دستیابی به مواد تا این‌حد مافوق پاک به شیوه‌های خاصی متوسل میشوند.

ژرمانیم و سیلیسیم مافوق پاک (اینها عمده‌ترین نمایندگان مواد نیمه رسانا هستند) را میتوان از طریق کشش بطی بلور درحال نمو از مذاب بدست آورد. میله‌ای را که در انتهای آن سر بلور نصب شده است به سطح ژرمانیم مذاب اتصال میدهند. سپس خیلی آهسته شروع به بلند کردن آن میکنند. بلوری که بدین ترتیب از ماده مذاب بیرون کشیده میشود از اتمهای ماده اصلی تشکیل شده است. اتمهای آمیزه در ماده مذاب باقی میمانند.

شیوه باصطلاح ذوب منطقه‌ای مورد استعمال گسترده‌تری پیدا کرده است. از عنصر پاک شده مفتولی با طول آزاد و قطر چند میلیمتری درست میکنند. کوره کوچک استوانه‌ای شکل و محیط بر مفتولی را در امتداد آن بحرکت در میاورند. درجه گرمای کوره برای ذوب کردن فلز کافی است و بخش واقع در درون کوره بحالت مذاب

در میاید. بدین ترتیب منطقه کوچک فلز مذاب در امتداد مفتول پیش میرود.

اتمهای آمیزه معمولاً آسانتر در مایع حل میشوند تا در جسم جامد. از اینرو در مرز منطقه مذاب، اتمهای آمیزه از قسمتهای جامد به منطقه مذاب انتقال میبابند و باز نمیگردند.

منطقه مذاب متحرک مثل اینکه اتمهای آمیزه را بدنبال خود میکشاند. در موقع بازگشت به عقب کوره را خاموش میکنند. جابجا ساختن منطقه مذاب در امتداد مفتول‌را بحدکافی مکرراً ادامه میدهند. پس از این، تنها اره کردن انتهای پاک نشده مفتول میماند.

مواد مافوق پاک‌را درخلاء و یا در محیط گازهای خنثی تهیه میکنند.

در صورتیکه نسبت اتمهای بیگانه زیاد باشد پاک‌سازی را از طرق دیگر انجام میدهند. ذوب منطقه‌ای وکشش بلور از ماده مذاب را تنها در پاک‌سازی کامل ماده بکار میبرند.

رونشینی (جذب سطحی)

گازها بندرت در اجسام جامد حل میشوند یعنی بندرت بداخل بلورها نفوذ میکنند. در عوض طریق دیگری برای جذب گازها بوسیله اجسام جامد موجود است. مولکولهای گاز بر روی سطح جسم جامد تجمع پیدا میکنند. این چسپیدن مخصوص بخودرا رونشینی مینامند.* بنابراین رونشینی آنگاه بوقوع میپیوندد که مولکول قادر به نفوذ بداخل جسم نیست و در عوض به سطح آن میچسبد.

رونشین شدن، یعنی جذب شدن به سطح. اما آیا چنین پدیده‌ای قادر به ایفای نقش تا اندازه‌ای قابل توجه میباشد؟ آخر لایه بقطر یک ملکول اگر بر روی جسم بزرگ هم کشیده شود وزنش نا چیز خواهد بود.

---

*نباید رونشینی (آدسوربسیون) را با آبسوربسیون که بمعنی جذب ساده است اشتباه کرد.

مساحت مولکول نه چندان بزرگی را در حدود ۱۰ انگستروم مربع یعنی $۱۰^{-۱۵}cm^۲$ محسوب میداریم. لذا در $۱cm^۲$ تعداد $۱۰^{۱۵}$ مولکول جای خواهد گرفت. این تعداد مولکول مثلاً آب دارای وزنی برابر $۳ \times ۱۰^{-۸}g$ گرم خواهدبود. حتی در یک متر مربع فقط ۰٫۰۰۰۳ g آب جا خواهد گرفت.

بر روی سطوح چند صدمتر مربعی مقدار ماده چشمگیرتر است. بر $۱۰۰m^۲$ مقدار ۰٫۰۳g آب ($۱۰^{۲۱}$ مولکول) جایگزین خواهد شد.

آیا ما باچنین سطوح معتنابهی در کار آزمایشگاهی خود بر خورد میکنیم؟ ولی درک این امر مشکل نیست که گاهی اجسام کاملاً خرد که بر نوک قاشق چایخوری جا میگیرند واجد سطوح بزرگ چند صد متر مربعی هستند.

مکعب با اضلاع یک سانتیمتری دارای مساحت سطوح $۶cm^۲$ است. مکعب را به ۸ مکعب با اضلاع ۰٫۵cm تقسیم میکنیم. مساحت سطوح هر مکعب $۰٫۲۵cm^۲$ است. تعداد کل سطوح مکعبها میشود $۶ \times ۸ = ۴۸$. مساحت همه آنها مساوی $۱۲cm^۲$ خواهد بود. بدین شکل مساحت دو برابر شد.

بدینسان هر گونه خرد کردن جسم با افزایش مساحت آن توام است. همین مکعب با اضلاع ۱ سانتیمتری را به اجزائی یک میکرونی تقسیم میکنیم. یک میکرون برابر $۱۰^{-۴}cm$ است، لذا مکعب ما به $۱۰^{۱۲}$ ذره تقسیم میشود. هر ذره‌ای (برای سهولت فرض میکنیم که شکل آن مکعب باشد) دارای مساحت ۶ میکرون مربع خواهد بود، یعنی $۶ \times ۱۰^{-۸}cm^۲$. جمع سطوح ذرات مساوی $۶ \times ۱۰^{۴} cm^۲$ یعنی ۶ متر مربع خواهد شد. تقسیم بذرات یک میکرونی را اصلاً نباید حد این کار دانست.

کاملاً مفهوم است که سطح مخصوص (یعنی سطح یک گرم ماده) ممکن است با ارقام عظیمی معادل گردد. با خرد کردن جسم سطح آن بسرعت افزایش مییابد، چون سطح هر ذره‌ای متناسب با مجذور اندازه کاهش مییابد، در حالیکه بر تعداد ذرات در واحد حجم متناسب با توان سوم اندازه افزوده میشود. یک گرم آب ریخته شده در ته استکان دارای سطحی معادل چند سانتیمتر مربع است. همین

یک گرم آب بشکل قطرات باران دارای سطحی باندازه دهها سانتیمتر مربع خواهدبود و یک گرم قطرات مه دارای سطحی معادل صدها متر مربع‌است.

اگر ذغال را خرد کنیم (هر چه ریزتر باشد بهتر) قادر است با سطح خود آمونیاک، انیدرید کربنیک و بسیاری گازهای سمی را جذب کند. خاصیت اخیر باعث شده که از ذغال در ماسکهای ضدگاز استفاده شود. ذغال بسیار خوب خرد میشود و اندازه ذرات آنرا میتوان تا چندین ده انگسترم رساند. از اینرو یک گرم ذغال مخصوص دارای سطحی است معادل صدها متر مربع. ماسک ضدگاز ذغال دار قادر به جذب دهها‌لیتر گاز است.

رونشینی وسیعاً در صنایع شیمیائی بکار برده میشود. مولکول گازهای مختلف ضمن رونشینی تماس بیشتری با یگدیگر پیدا کرده و بین آنها آسان‌تر فعل‌وانفعال شیمیائی انجام میگیرد.

برای تسریع جریانهای شیمیائی غالباً چه از ذغال و چه از گرد فلزاتی مانند نیکل، مس، وغیره استفاده میشود.

مواد تسریع کننده فعل وانفعالهای شیمیائی را کاتالیزاتور مینامند.

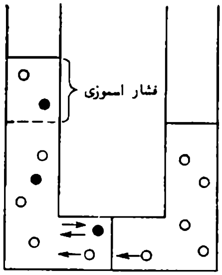
تراوش (اسموز)

در میان بافت‌های زنده غشاهای خاصی موجودند که درعین نفوذ نا پذیر بودن برای ملکولهای مواد محلول در آب، خود آب‌را پس میدهند.

خاصیت این غشاها علت پدیده‌ی فیزیکی مشهور به اسمتیک (یا بطور ساده اسموز) را تشکیل میدهد.

تصورکنید که چنین پردای لوله به شکل U را بدو بخش تقسیم میکند. در یک زانوی لوله محلول و در زانوی دیگر آن آب و یا محلل دیگری ریخته میشود. با اینکه مقداری مساوی مایع در هردو زانو ریخته شده با کمال تعجب مشاهده میکنیم که با وجود همتراز بودن سطوح موازنه برقرار نشده و پس از مدت کوتاهی در زانوهای مختلف دو سطح متفاوت بوجود میاید. ضمناً

ارتقاء سطح در زانوئی که محلول در آنست رخ میدهد. آب جدا شده بوسیله حایل نیمه نفوذپذیر سعی میکند محلول را رقیق سازد. این پدیده بنام اسموز معروف است و اختلاف ارتفاع در دو زانو را فشار اسمتیک میخوانند.



شکل ۱۰۸

علت فشار اسمتیک چیست؟

در زانوی راست ظرف (شکل ۱۰۸) فشار تنها بوسیله آب بوجود میآید در حالیکه در زانوی‌چپ فشار از مجموع فشارهای آب و ماده حل شده تشکیل میشود. اما راه ارتباط فقط برای آب بازاست و باوجود حایل نیمه نفوذپذیر موازنه تنها هنگامی برقرار میشود که فشار آب خالص در یک زانو مساوی فشار آب خالص در زانوی دیگر شود نه آنگاه که فشار در سمت چپ مساوی فشار کل در سمت راست باشد. تفاوت دو فشار برابر فشار ماده حل شده میباشد.

این اضافه فشار همان فشار اسمتیک است. چنانکه تجربه و محاسبه نشان میدهند فشار اسمتیک برابر فشار گاز مرکب از ماده حل شده و دارای همان حجم میباشد. از اینرو باعث شگفتی نیست که فشار- اسمتیک از لحاظ کمی قابل توجه است.

فشار اسمتیک در یک‌لیتر آب را که ۲۰ گرم شکر در آن حل‌شده باشد محاسبه میکنیم (غلظت شکر در استکان چای احتمالاً بیشتر است). وزن مولکولی شکر که فرمول شیمیائی آن $C_{12}H_{22}O_{11}$ است مساوی ۳۴۲ میباشد. بنا به شروط مسئله در یک لیترآب ۲۰/۳۴۲ مول شکر موجود است. بدین ترتیب یک مول شکر در حجمی مساوی $۱۷٫۱ = \frac{۳۴۲}{۲۰}$ لیتر حل خواهد شد. اما در شرائط «نرمال» (صفر درجه حرارت و یک آتمسفر فشار) یک مول گاز ۲۲٫۴ لیتر حجم اشغال خواهد کرد. بر طبق قانون گازهای ایده‌آل فشار شکری

که مثل گاز مورد بررسی قرار میگیرد در حرارت صفر درجه سانتیگراد برابر $\frac{۲۲,۴}{۱۷,۱}$ آتمسفر و در حرارت ۲۰ °C مساوی $\frac{۲۲,۴}{۱۷,۱}\times\frac{۲۹۳}{۲۷۳}=۱,۴$ آتمسفر خواهد بود. این همان فشار اسمتیک شکر است. در آزمایش با غشاء نیمه نفوذپذیر این فشار اسمتیک با ستون آب ۱۴ میلیمتر متعادل میشد.

در اینجا بیمناسبت نیست به ارتباط تاثیر مسهلی محلولهای برخی از نمک‌ها با فشار اسمتیک اشاره کنیم. جدار روده برای برخی از محلولات نیمه نفوذپذیر است. چون نمک از جدار روده عبور نمیکند (نمک گلوبر اینجور است) در روده‌ها فشار اسمتیکی ایجاد میشود که از راه بـها آبرا ازدرون بدن بروده‌ها میمکد.

چرا آب بسیار شور رفع عطش نمی کند؟ معلوم میشود که در اینجا نیز گناه بگردن فشار اسمتیک است. کلیه‌ها با فشار اسمتیک بیش از فشار موجود در بافت‌های بدن قادر به اخراج پیشاب نیستند. بدین جهت بدن پس از دریافت آب دریا، نه‌فقط آنرا به مایعات بافتها ملحق نمیکند، بلکه برعکس آب گرفته شده از بافتها را با پیشاب اخراج میکند.

سایش

نیروهای اصطکاک

اولین بار نیست که ما راجع به اصطکاک صحبت میکنیم. واقعاً هم چطور میشد ضمن تشریح حرکت از اصطکاک صحبتی به میان نیاورد؟ تقریباً هر گونه حرکت اجسام دور و بر ما با اصطکاک همراه است. اتوبیلی که موتور آنرا خاموش کنند متوقف میشود، آونگ پس از نوسانات زیاد از حرکت باز می‌ایستد. گلوله کوچک فلزی که در ظرف شیشه‌ای پر از روغن آفتابگردان انداخته شود باهستگی فرو میرود. چه چیزی جسم متحرک بر روی سطحی را وادار به توقف میکند؟ علت آهستگی سقوط گلوله در روغن چیست؟ ما به این پرسشها پاسخ میدهیم: علت امر در نیروهای اصطکاک است که در جریان حرکت اجسامی در امتداد سطح اجسام دیگر بوجود میآیند.

اما نیروهای اصطکاک تنها در حین حرکت ایجاد نمیشوند. حتماً بر اتیان اتفاق افتاده است که مبل خانه را در اطاق جا بجا کنید. بنابراین متوجه شده‌اید که تغییر مکان‌دادن یک کمد سنگین از جایش چقدر مشکل است. آن نیروئی را که در مقابل تلاش شما واکنش نشان میدهد نیروی اصطکاک سکون نامند.

نیروهای اصطکاک هم در موقعیکه ما جسمی را روی زمین میکشیم و هم در ضمن غلطانیدن آن بوجود میآیند. این دو پدیده فیزیکی تا حدی از هم متمایزند. از اینرو دو نوع اصطکاک، اصطکاک لغزش و اصطکاک غلطش را مشخص میسازند. اصطکاک غلطش دهها بار از اصطکاک لغزش کمتر است.

البته در برخی مواقع لغزش نیز با سهولت زیادی انجام میشود.

سورتمه بسادگی روی برف میلغزد و یخ‌سره از آن هم سهل‌تر سر میخورد.

نیروی اصطکاک به چه وابسته است؟

نیروی اصطکاک بین اجسام جامد ارتباط کمی با سرعت حرکت دارد و متناسب با وزن جسم است. اگر وزن جسم دو بار افزایش یابد بحرکت در آوردن و کشیدن آن دو بار مشکل‌تر میشود. این طرز بیان مطلب کاملاً دقیق نیست. چون وزن جسم چندان مهم نیست، نیروئی که جسم را به سطح سچسباند بیش از وزن آن اهمیت دارد. اگر روی جسم سبکی با دست فشار بیاوریم، البته بر نیروی اصطکاک افزوده خواهد شد. اگر نیروی فشارندهٔ بر سطح را (که قسمت اعظم آنرا وزن تشکیل میدهد) با حرف P نشان دهیم، برای نیروی اصطکاک $F_{\text{اصطکاک}}$ فرمول ساده زیر صادق خواهد بود:

$$F_{\text{اصطکاک}} = kP$$

پس خواص سطوح مختلف چگونه در نظر گرفته میشوند؟ چون بخوبی معلوم است که اگر سطح پایه لغزندهٔ سورتمه‌ای را با روکش آهنی بپوشانیم، لغزندگی آن خیلی بهتر خواهد بود. این کیفیت بوسیله ضریب تناسب k در نظر گرفته میشود که ضریب اصطکاکش خوانند.

ضریب اصطکاک فلز روی چوب مساوی $\frac{۱}{۲}$ است. اگر قطعهٔ فلزی دو کیلوگرمی را روی میز چوبی صافی قرار دهیم، آنرا تنها با نیروئی برابر یک کیلوگرم میتوان حرکت داد، در حالیکه ضریب اصطکاک فولاد روی یخ مساوی ۰٫۰۲۷ است که امکان میدهد همین قطعه را با نیروئی مساوی ۵۴ گرم بحرکت در آورد.

در فرمول نامبرده بالا مساحت سطح لغزش نقشی ندارد: نیروی اصطکاک با مساحت سطح تماس اجسام لغزان بر روی هم مربوط نیست. برای حرکت‌دادن از جا و یا کشیدن یک صفحه فولادی بوزن یک کیلو گرم با سرعت یکنواخت همانقدر نیرو لازمست که برای یک وزنهٔ یک کیلوگرمی که برسطح خیلی کوچکی اتکاء دارد.

باز هم یک یاد آوری دیگر در باره نیروهای اصطکاک در ضمن

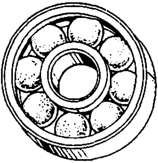
لغزش. تکان‌دادن جسم از جایش تا حدی مشکل‌تر از کشیدن آنست: نیروی اصطکاکی که در لحظه نخست حرکت باید از میان بر داشته شود (اصطکاک سکون) باندازه ۲۰ تا ۳۰ در صد بیشتر از مقادیر بعدی نیروی اصطکاک است.

در باره نیروی اصطکاک غلطش مثلا چرخ چه میتوان گفت؟ در اینجا هم مانند مورد لغزش هر چه نیروی فشارد‌هنده چرخ بر سطح بیشتر باشد، اصطکاک افزونتر خواهد بود. علاوه بر این نیروی اصطکاک با قطر چرخ نسبت معکوس دارد. دلیل این امر کاملاً مفهوم است: هرچه وطر چرخ بیشتر باشد ناهمواری راه برای آن اهمیت کمتری خواهد داشت.

اگر نیروهائی را که بایستی در حالات لغزش و غلطش یک جسم بر طرف شوند با هم مقایسه کنیم تفاوت بین آنها بسیار محسوس خواهد بود. مثلاً برای کشیدن شمش فولادی بوزن یک تن بر روی اسفالت بکار بردن نیروئی برابر ۲۰۰ کیلوگرم لازمست که تنها از عهده وزنه برداران سنگین بر میآید، در حالیکه کشیدن همین بار با یک ارابه از عهده کودکی نیز ساخته است. برای اینکار فقط ده کیلوگرم نیرو لازم است.

تعجبی ندارد که اصطکاک غلطش بر اصطکاک لغزش «پیروز» شده است و بیهوده نیست که بشریت از قدیم الایام بحمل و نقل با وسایل چرخ اقدام کرده است.

تعویض سطوح لغزش با چرخ را هنوز نمیتوان بعنوان پیروزی کامل بر اصطکاک لغزش تلقی نمود. چونکه چرخ را باید بر روی محور مستقر ساخت. در نظر اول احتراز از اصطکاک محورها با تکیه گاه غیر ممکن است. قرنها اینطور میاندیشیدند و تنها با مالیدن انواع روغنها میکوشیدند اصطکاک لغزش را در تکیه‌گاه‌ها تخفیف دهند. نقش روغنکاری کم نیست. اصطکاک لغزش در نتیجهٔ آن ۸ تا ۱۰ بار کاهش مییابد. اما در موارد متعددی حتی در صورت روغن‌کاری هم اصطکاک لغزش بحدی است که بسیار گران تمام میشود. در اواخر سده گذشته این عامل رشد تکنیک را بشدت دچار وقفه میساخت. آنگاه بود که فکر تعویض اصطکاک لغزش با اصطکاک در یاتاقانها پدید آمد. این تعویض بوسیله یاتاقانهای ساچمه‌ای انجام میگیرد.



شکل ۱۰۹

بین محور و غلاف ساچمه‌های چندی قرار دادند. هنگام گردش چرخ، ساچمه‌ها بر سطح غلاف و محور بر روی ساچمه‌ها میغلطند. در شکل ۱۰۹ ساختمان این مکانیزم نشان داده شده است. بدینسان اصطکاک غلطش جایگزین اصطکاک لغزش گردید و از نیروی اصطکاک دهها بار کاسته شد.

نقش یاتاقانهای غلطشی در تکنیک امروزی بسیار ارزشمند است. انواع مختلف آن با ساچمه، با غلطک‌های استوانه‌ای و مخروطی ساخته میشود. تمام ماشینها از خرد تا کلان به‌این یاتاقانها مجهزند. یاتاقانهای ساچمه‌ای در مواردی قطرشان بیک میلیمتر میرسد. برای ماشین های بزرگ یاتاقانهائی به وزن بیش از یک تن بکار برده میشود. ساچمه های این یاتاقانها (شما لابد آنها را در ویترین مغازه‌های ویژه دیده‌اید) به اقطار مختلف از اعشار میلیمتر گرفته تا چندین سانتیمتر تولید میشوند.

اصطکاک گرانرو در مایعات و گازها

تا کنون ما از اصطکاک «خشک» سخن گفتیم یعنی اصطکاکی که ضمن تماس اشیاء جامد با هم بوجود میاید. اما اجسام شناور و پرنده نیز تحت تاثیر نیروی اصطکاک قرار میگیرند. در این موارد تنها منشاء اصطکاک عوض میشود — اصطکاک «تر» جانشین اصطکاک خشک میگردد.

مقاومتی که جسم متحرک در آب و یا در هوا با آن رو برو میشود تابع قوانین دیگری است که با قوانین اصطکاک خشک که در بالا شرح داده شد تفاوت اساسی دارند.

در مسئله اصطکاک بین مایع و گاز تفاوتی موجود نیست. از اینرو همه آنچه را که ما ذیلا شرح خواهیم داد باید بدرجه واحدی بهر دو آنها منسوب دانست. اگر ما برای اختصار تنها در مورد «مایع» صحبت کنیم گفته ما مربوط به گاز نیز میباشد.

یکی از تفاوتهای موجود بین اصطکاک «تر» و خشک فقدان اصطکاک سکون میباشد. جسم آویخته در آب و یا در هوا را بطور کلی، با نیروی خیلی کمی میتوان از جا تکان داد. و اما در مورد نیروی اصطکاک که موثر بر جسم متحرک است باید بگوئیم که میزان آن با سرعت حرکت و شکل و اندازه جسم و خواص مایع ویا گاز بستگی دارد. بررسی حرکت اجسام در مایعات و گازها نشان داد که قانون واحدی برای اصطکاک «تر» وجود ندارد، بلکه دو قانون مختلف هست که یکی برای سرعت های کم و دیگری برای سرعت های زیاد حرکت صادق میباشد. وجود دوقانون بدانمعنی است که اگر سرعتهای حرکت اجسام جامد در مایعات و گازها زیاد یا کم باشد، تاثیر محیط بر جسم متحرک در آن بطور متفاوتی انجام میگیرد.

در سرعت های کم حرکت نیروی مقاومت با سرعت و ابعاد جسم نسبت مستقیم دارد.

$$F \propto vL$$

این سئوال پیش میآید که در حالی که ما تا کنون از شکل اجسام صحبتی نکردهایم، تناسب با ابعاد بچه معناست؟

این بدانمعناست که برای دو جسم کاملاً مشابه از لحاظ شکل (یعنی اجسامی که تمام اندازههایشان با هم دارای نسبت واحدی باشند) نسبت نیروهای مقاومت و ابعاد خطی آن دو جسم با هم یکسان است.

کمیت مقاومت تا حد زیادی به خواص مایع بستگی دارد. با مقایسه نیروهای اصطکاکی که از حرکت اجسام یکسان با سرعتهای یکسان در محیط های مختلف بوجود میاید میبینیم که هر چه غلظت محیط بیشتر و یا باصطلاح گرانرو تر باشد مقاومتی که جسم متحمل میشود بیشتر خواهد بود. بدین سبب اصطکاک مورد بحث را بجاست اصطکاک گرانروی بنامیم. کاملاً مفهوم است که هوا اصطکاک گرانروی ناچیزی

ایجاد میکند که تقریباً ۶۰ بار کم‌تر از آب است. مایعات غلظتهای مختلف دارند. ممکن است مانند آب رقیق ویا چون سر شیر و عسل گرانرو باشند.

در باره درجه گرانروی مایع یا از روی سرعت سقوط اجسام جامد در آن ویا از روی سرعت خروج مایع از روزنه‌ها میتوان قضاوت نمود.

آب از قیف نیم‌لیتری در عرض چند ثانیه خارج میشود، در حالیکه مایع بسیار گرانرو برای اینکار ساعتها ویا روزها لازم دارد. میتوان مثال مایع باز هم گرانروتری را آورد. زمین‌شناسان متوجه شدند که در دهانه‌های برخی از آتش فشانها در میان انبوه‌گدازه‌ها قطعات گوی مانند دیده میشوند. در نظر اول مفهوم نیست چگونه در داخل دهانه آتشفشان چنین گویهائی از گدازه‌ها درست شده‌اند. این موضوع نامفهوم میماند، اگر گدازه را بعنوان جسم جامدی فرض کنیم. اگر گدازه مایع گون باشد مثل مایعات دیگر بشکل قطراتی از قیف دهانه آتش‌فشان خارج خواهد شد. با این تفاوت که یک قطره‌ی آن نه در اعشار ثانیه، بلکه طی دهها سال ایجاد میشود، وقتی که قطره بسیار سنگین شود از جا کنده شده و به ته دهانه آتش‌فشان «میچکد».

از این مثال روشن میشود که نباید اجسام جامد واقعی را با اجسام غیرمتبلور (بی‌شکل) که بطوریکه میدانیم بیشتر شبیه مایعات میباشند تا بلورها، در یک ردیف قرار داد. گدازه نیز از همین اجسام بی‌شکل است که ظاهراً جامد بنظر میرسد ولی در واقع مایعی است بسیار گرانرو.

شما چه فکر میکنید؟ آیا لاک جامد است؟ دو چوب پنبه را بر دارید و آنها را کف دو فنجان قرار دهید. در یکی از فنجانها ملحی مذاب (مثلاً شوره را که زودتر بدست میآید) و در فنجان دیگر لاک بریزید. هر دو مایع متجمد شده و چوب پنبه‌ها را در خود مدفون میکنند. این دو فنجان را در قفسه بگذارید و مدتی دراز به آنها دست نزنید. پس از چند ماه تفاوت بین لاک و نمک را مشاهده خواهید کرد. چوب پنبه‌ای که در نمک بود همانطور در ته ظرف خواهد ماند. در حالیکه چوب پنبه از درون لاک بالا میآید. علت امر خیلی ساده است: چوب پنبه همانطور که از توی آب بالا میآید،

از درون لاک هم بالا آمده است. تفاوت فقط در زمان است: وقتی نیروهای اصطکاک گرانروی کم باشد، چوب پنبه فوری روی مایع میآید، در حالیکه در مایعات بسیار گرانرو این کار ماهها ادامه خواهد داشت.

نیروهای مقاومت در جریان سرعتهای زیاد

حالا بر میگردیم به قوانین اصطکاک «تر» بطوریکه گفتیم در سرعتهای کم، مقاومت با گرانروی مایع، سرعت حرکت و ابعاد جسم بستگی دارد. اینک به بررسی قوانین اصطکاک در جریان سرعتهای زیاد میپردازیم. بدواً باید خاطرنشان ساخت که چه سرعتهائی را کم و چه سرعتهائی را زیاد میشماریم. منظور ما قدر مطلق سرعت نیست، بلکه اینست که آیا سرعت بقدر کافی کم هست که قانون اصطکاک گرانروی بررسی شده در بالا صادق باشد یا نه.

معلوم میشود که نمیتوان آنچنان رقم متر در ثانیه‌ای را نام برد که در تمام موارد سرعتهای کم مرز عملکرد قانون اصطکاک گرانروی باشد. این مرز به ابعاد جسم و درجه گرانروی و چگالی مایع مربوط است.

برای هوا سرعتهای کمتر از:

$$\frac{۰٫۷۵}{L\,(\text{cm})}\,\frac{\text{cm}}{\text{sec}}$$

برای آب ـ کمتر از

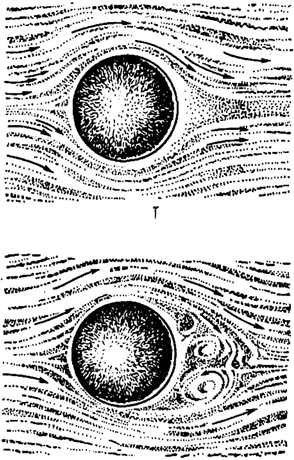
$$\frac{۰٫۰۵}{L\,(\text{cm})}\,\frac{\text{cm}}{\text{sec}}$$

و برای مایعات گرانرو نظیر عسل غلیظ ـ سرعتهای کمتر از

$$\frac{۱۰۰}{L\,(\text{cm})}\,\frac{\text{cm}}{\text{sec}}$$

سرعتهای «کم» محسوب میشود.

بدینسان در مورد هوا و بویژه در مورد آب قوانین اصطکاک گرانروی خیلی کم قابل استفاده میباشند. حتی در سرعتهای کم



آ

ب

شکل ۱۱۰

حدود ۱cm/sec، این قوانین تنها بدرد اجسام خرد به ابعاد یک میلیمتری میخورند.

مقاومتی که انسان هنگام شنا در زیر آب احساس میکند بهیچوجه تابع قانون اصطکاک گرانروی نیست.

این مساله را که با تغییر سرعت، مقاومت محیط تغییر میکند چگونه میتوان توضیح داد؟ علل این امر را باید در تغییر خصلت جریان مایع در اطراف جسم متحرک در آن جستجو کرد. در شکل ۱۱۰ دو استوانه مدور متحرک در مایع کشیده شده اند (محور استوانه عمود بر صفحهٔ ترسیم است).

مایع ضمن حرکت کند شیئی شناور در خود را به نحوه‌ای روان دور میزند. در این حالت نیروی مقاومتی که شیئی باید بر طرف سازد

همان نیروی اصطکاک گرانروی است (شکل آ,۱۱۰). ضمن حرکت سریع، پشت سر جسم متحرک حرکت بغرنج و سر در گم مایع پدیدار میشود (شکل ب,۱۱۰). در مایع جریان‌های مختلفی با اشکال عجیب و غریب مانند حلقه و گرداب گاه بوجود میآیند و گاه از بین میروند. منظره جریانها پیوسته در حال دگرگونی است. پیدایش این حرکت که آنرا حرکت آشفته مینامند قانون مقاومت را از ریشه تغییر میدهد. رابطه مقاومت آشفته با سرعت و ابعاد جسم بکلی مغایر ارتباط مقاومت گرانروی با این مقادیر است. مقاومت آشفته با مجذور سرعت و مجذور ابعاد خطی متناسب است. در این حرکت گرانروی مایع نقش قابل ملاحظه‌ای ندارد و چگالی آن به خاصیت تعیین‌کننده تبدیل میشود. ضمناً نیروی مقاومت با توان یکم چگالی مایع (گاز) متناسب است. بدین ترتیب برای نیروی F مقاومت آشفته فرمول زیر صادق است

$$F \backsim \rho v^2 L^2$$

در اینجا v سرعت حرکت، L ابعاد خطی جسم و ρ چگالی محیط میباشد. ضریب تناسب عددی را که ما در اینجا نیاورده‌ایم، بسته به شکل جسم‌دارای مقادیر مختلفی خواهد بود.

شکل مناسب برای نفوذ در مایع ویا گاز

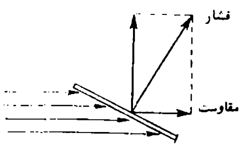
چنانکه در بالا گفته شد، حرکت در هوا تقریباً همیشه «سریع» است و این بدانمعناست که نقش اساسی بعهده مقاومت آشفته است نه مقاومت گرانرو. هواپیماها، پرندگان و چتربازان در معرض مقاومت آشفته قرار میگیرند. اگر شخص در هوا بدون چترنجات پائین بیافتد، پس از مدت کوتاهی سقوط وی یکنواخت میشود (نیروی مقاومت با وزن متعادل میگردد)، ولی با سرعت خیلی زیاد حدود ۵۰ متر در ثانیه. باز کردن چتر منجر به کند شدن شدید سرعت سقوط خواهد شد. و اینک همان وزن سابق با مقاومت گنبد چترنجات متعادل میگردد. از آنجا که نیروی مقاومت هوا با سرعت حرکت و ابعاد شیئی سقوط کننده بدرجه یکسانی متناسب میباشد، سرعت بهمان نسبت تغییر ابعاد خطی جسم سقوط‌کننده کاهش می‌یابد. قطر چترنجات در حدود ۷ متر است و

«قطر» انسان تقریباً یک متر. سرعت سقوط تا v m/sec کاهش مییابد. با این سرعت میتوان بدون خطر بزمین فرو آمد.

لازم بتذکر است که مسأله ازدیاد مقاومت بسیار ساده‌تر از عکس آن حل میشود. تخفیف مقاومت هوا در جریان حرکت اتومبیل و پرواز هواپیما یا تقلیل مقاومت آب ضمن حرکت زیر دریائی از مسائل فنی مهم و در عین حال بغرنجی است.

از قرار معلوم با تغییر شکل جسم میتوان مقاومت آشفته را بمیزان زیادی کاهش داد. برای این کار بایستی حرکت آشفته را که زاینده‌ی مقاومت است بحد اقل رساند. دستیابی به این مقصود با دادن شکل مخصوص به جسم که باصطلاح مناسب برای لغزش مایع ویا گاز بر سطوح خارجی آن باشد امکان‌پذیر میگردد.

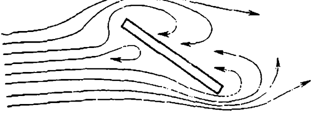
چه شکلی این منظور را به بهترین وجه بر آورده میسازد؟ در اولین نظر این تصور بوجود میآید که به جسم باید چنان شکلی داده شود که تیزی آن بجلو حرکت کند. تصور میرود که این تیزی باید هوا را به بهترین طرز بشکافد. اما از قرار معلوم، شکافتن هوا آنقدر مهم نیست. بایستی بحد امکان کمتر آنرا مشوش ساخت تا هوا بتواند رواتر در اطراف جسم سر بخورد. بهترین پروفیل جسم متحرک در مایع یا گاز شکلی است که ار جلو پهن و از عقب تیز باشد.* در این حالت مایع از تیزی عقب با روانی سر میخورد و آشفتگی حرکت به حداقل میگراید. ابداً نباید گوشه‌های تیز را متوجه جلو کرد، چون لبه تیز موجب بروز حرکت آشفته میشود.



شکل ۱۱۱

مناسب بودن شکل بال هواپیما برای جریان هوا نه تنها پرواز را با حداقل مقاومت رو برو میسازد، بلکه وقتیکه سطح واجد شکل مناسب در جهت حرکت متمایل ببالا قرار گرفته باشد

*دماغه‌های تیز قایق‌ها و کشتی‌ها برای شکافتن امواج لازمند یعنی فقط موقعی که حرکت در سطح آب انجام میگیرد.



شکل ۱۱۲

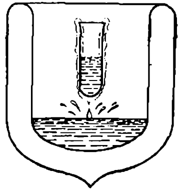
نیروی فرابری را نیز بحداکثر میرساند. هوا ضمن سر خوردن در اطراف بال بطور عمده در جهت عمود بر سطح آن فشار وارد میآورد (شکل ۱۱۱). روشن است که برای بال متمایل این نیرو متوجه بالاست.

با افزایش زاویه بر نیروی بالابری افزوده میشود. اگر تنها جوانب هندسی امر در نظر گرفته شود ممکنست چنین نتیجه نا درستی بدست آید که هرچه زاویه نسبت به جهت حرکت بزرگتر باشد بهتر است. اما در واقع ضمن افزایش این زاویه جریان یافتن روان هوا با اشکال بیشتری رو برو میشود و اگر زاویه به درجه معینی برسد، چنانکه در شکل ۱۱۲ نشان داده شده است، آشفتگی شدیدی بوجود میاید و بر مقاومت بسیار افزوده میگردد و از نیروی بالاروی کاسته میشود.

نابودی گرانروی

اکثراً ضمن توضیح این یا آن پدیده و توصیف حالات مختلف یک جسم بمثالهای آشنا رجوع میشود. بعلت یگانگی قوانین حرکت اجسام، قیاس پدیده‌های نو با پدیده‌های برخورد شده و آشنا فهم مطلب را آسانتر ساخته و آنرا قانع‌کننده‌تر میکند. روی همین اصل ما بسهولت قوانین حرکت مایعات را برای خوانندگان تشریح کردیم، چون میدانستیم که هر کس چگونگی جریان آب را مشاهده نموده و قوانین حرکت آنرا عادی تلقی میکند.

لاکن مایعی وجود دارد با خواصی بکلی شگفت‌انگیز و فاقد تشابه با مایعات دیگر که حرکتش بر طبق قوانین مختص بخود انجام میگیرد. قبلاً متذکر شدیم که هلیوم مایع حالت میعان خود را تا درجه



شکل ۱۱۳

حرارت صفر مطلق نیز حفظ میکند، منتها هلیوم در حرارت بیش از ۲°K (دقیقتر بگوئیم – ۲,۱۹°K) و هلیوم پائینتر از این درجه حرارت دو مایع بکلی متفاوتند. در دمای بالاتر از این درجه بین هلیوم و مایعات دیگر هیچگونه وجه تمایزی وجود ندارد، در حالیکه در درجات حرارت پائین‌تر هلیوم به مایع شگفت آوری تبدیل میگردد و بنام هلیوم ۲ خوانده میشود.

حیرت آورترین خاصیت هلیوم ۲ که در سال ۱۹۳۸ توسط فیزیکدان شوروی پ. ل. کاپیتسا کشف شده، فوق روانی، یعنی فقدان کامل گرانروی است.

برای مشاهده فوق روانی هلیوم ظرفی تهیه کردند که در ته آن درز بسیار باریکی به پهنای فقط نیم میکرون تعبیه شده است. مایع عادی تقریباً از لای اینگونه درز بخارج نشت نمیکند. هلیوم در درجات حرارت فوق ۲,۱۹°K نیز همین حالت را دارد، اما بمجرد اینکه درجه حرارت ۲,۱۹°K پائین‌تر بیاید، بر سرعت خروج هلیوم هزاران بار افزوده میشود و محتوی ظرف تقریباً از لای درز بیرون میریزد. این دال بر آنست که هلیوم بکلی گرانروی خود را از دست داده است. فوق روانی هلیوم ۲ پدیده باز هم عجیب‌تری را باعث میشود: هلیوم ۲ که در استکان و یا لوله‌ی آزمایشی ریخته شده، قادر است بخودی خود از لبه‌های ظرف فرا ریزد.

در شکل ۱۱۳ نحوه انجام این آزمایش نشان داده شده است. لوله‌آزمایشی حاوی هلیوم ۲ را در «دیوآر»* روی طشتک هلیوم قرار میدهند. هلیوم بصورت قشر بسیار نازک و نامرئی از جدار لوله‌ـ آزمایش بالا رفته و از لبه آن بخارج سرازیر میشود و از سطح تحتانی لوله قطره قطره میچکد.

بایستی در نظرداشت که در اثر نیروهای شعری مذکور در صفحه ۲۱۸ ملکولهای هر مایع که جدار ظرف خود را تر میکند، از

---

*بنام فیزیکدان و شیمیست انگلیسی «دیوآر»: مترجم

دیواره ظرف بالا رفته و بر روی آن قشر فوق‌العاده نازکی که ضخامت آن در حدود یک میلیونیم سانتیمتر است تشکیل میدهد. این قشر نازک را چشم تشخیص نمیدهد وا صولًا در مایعات گرانرو معمولی بهیچ وسیله‌ای خود را نشان نمیدهد.

اما در مورد هلیوم ۲ که فاقد گرانروی است قضیه بکلی دگرگون میشود. همانطور که درز بسیار باریک مانع خروج هلیوم فوق روان نبود قشر بسیار نازک سطحی نیز همان عمل درز را انجام میدهد. مایع فاقد گرانروی بصورت قشر بسیار نازک جریان مییابد. قشر سطحی بر جدار استکان ویا لوله‌آزمایش چیزی شبیه سیفون بوجود میآورد که هلیوم ۲ از طریق آن بالا رفته و از لبه‌ی فوقانی ظرف به بیرون سرازیر میشود.

بدیهی است که در مورد مایع گرانرو عادی این پدیده بچشم نمیخورد، زیرا گرانروی آن مانع گذار سریع از «سیفون» بدین نازکی است. حرکت این مایعات به بالا بحدی کند است که برای خروجشان از لبه ظرف میلیونها سال وقت لازم است.

پس معلوم شد که هلیوم ۲ فاقد هر گونه گرانروی است از اینجا منطقاً این نتیجه بدست میآید که حرکت یک جسم جامد خارجی در آن بایستی بدون اصطکاک باشد. ولی عملاً اینطور نیست. برای امتحان اینکار دیسکی را که به نخی آویخته است در هلیوم مایع فرو میبریم و نخ را تاب میدهیم. این اسباب ساده پس ازرهائی مثل آونگ بنوسان در میآید. نخ همراه با دیسک نوسان کرده و متناوباً گاه به یکسو و گاه بسوی دیگر تاب خواهد خورد. اگر اصطکاک نباشد، دیسک باید بی نهایت به نوسان خود ادامه دهد. اما مشاهده میکنیم که اینطور نمیشود. بعد از مدت نسبتاً کوتاهی که تقریباً برابر زمان نوسان در هلیوم ۱ (یعنی هلیوم با دمای بیشتر از ۲/۱۹°K) است دیسک از حرکت باز میایستد.

جای شگفتی است که هلیوم ضمن خروج از روزنه فوق‌العاده باریک فاقد هر گونه گرانروی بود، در صورتیکه حرکت یک جسم خارجی در آن مثل مایعات گرانرو عادی با اصطکاک توام است. این دیگر واقعاً پدیده‌ای است غیرعادی و نامفهوم.

حالا واقعیت عدم انجماد هلیوم تا دمای صفر مطلق را که در

مبحث پیش گفته شد بخاطر بیاوریم. با این ترتیب تمام تصورات مانوس ما در باره حرکت کارائی خود را از دست میدهند. از مایعی که بر غم هر گونه قاعده و قانونی تا صفر مطلق در حالت میعان میماند البته انتظار روشهای خلاف قاعده دیگری را نیز میتوان داشت.

رفتار هلیوم مایع را تنها از دیدگاه تصورات نوین در باره حرکت که به مکانیک کوانتائی معروفند میتوان مورد تفسیر قرار داد.

در اینجا میکوشیم در باره اینکه چگونه روش هلیوم مایع بوسیله مکانیک کوانتائی توضیح داده میشود تصوری بسیار کلی ارائه دهیم.

مکانیک کوانتائی نظریه‌ای است بسیار پیچیده و فهم آن بسیار دشوار است. از اینرو خواننده نباید از اینکه توضیح مطلب ظاهراً از خود مطلب عجیبتر است دچار شگفتی بشود. بر طبق این نظریه هر ذره هلیوم در آن واحد در دو نوع حرکت شرکت میکند که یکی از آنها حرکت فوق روان آزاد از گرانروی و دیگری حرکت معمولی و توام با گرانروی است.

بدین ترتیب هلیوم ۲ طوری عمل میکند که گوئی مخلوطی است از دو مایع که مستقل از هم حرکت میکنند. یکی از این دو مایع گرانرو و دیگری فوق روان است.

جریان هلیوم از لای درز ویا از لبه استکان نمودار فوق روانی است ولی در مورد نوسان دیسک، اصطکاک از آنجهت بوجود میآید که در بخش عادی هلیوم اصطکاک دیسک ناگزیر است.

قابلیت هلیوم بشرکت همزمان در دو حرکت خاصیت گرمارسانائی فوق‌العاده آنرا توضیح میدهد. چنانکه گفته شد عموماً مایعات گرما را خوب منتقل نمیسازند و هلیوم ۱ نیز از این لحاظ با مایعات عادی فرقی ندارد. ولی پس از استحاله به هلیوم ۲ گرما رسانائی این مایع در حدود میلیارد بار افزایش می‌یابد. در نتیجه هلیوم ۲ گرما را حتی بهتر از رساناهای تراز اولی چون مس و نقره منتقل میسازد.

مطلب در اینجاست که حرکت فوق روان هلیوم راساً در انتقال گرما شرکتی ندارد. با پیدایش اختلاف دما در هلیوم ۲ دو جریان در جهات مقابل هم که یکی از آنها عادی و ناقل گرماست ایجاد میشود. در اینجا هیچ وجه تشابهی با گرمارسانائی معمولی وجود

ندارد. در مایعات عادی انتقال گرما از طریق بر خورد مولکولها بیکدیگر عملی میشود، در حالیکه در هلیوم ۲ گرما همراه بخش عادی هلیوم همچون مایع بسیلان در میآید. اینجاست که اصطکاک «جریان گرما» واقعاً با مضمون آن وفق پیدا میکند. گرمارسانائی بسیار زیاد هلیوم مایع نتیجه همین نحوه انتقال است.

اینگونه توضیح گرمارسانائی هلیوم بحدی عجیب بنظر میرسد که ممکن است شما آنرا باور نکنید. معذلک آزمایش زیر که مبتنی برایده سادهای است صحت آن را آشکار میسازد:

ظرف «دیوآر» پر از هلیوم مایع در طشتک حاوی همین مایع قرار داده میشود. ظرف بوسیله دنباله موئین خود با طشتک مربوط است. هلیوم در ظرف بوسیله سیم پیچ الکتریکی گرم میشود. ولی بعلت عایق بودن جدار ظرف گرما به خارج سرایت نمیکند. در مقابل لوله موئین پره نازکی که به نخی آویزان شده است قرار داده میشود. اگر گرما مثل مایع عادی جاری باشد باید پره را بچرخاند. عملاً همین طور هم میشود و ضمناً مقدار هلیوم هم درون ظرف ثابت میماند. چگونه میشود این پدیده عجیب را توضیح داد؟ فقط از یک طریق: در جریان گرم کردن هلیوم جزء عادی از موضع گرم به سرد جاری میشود در حالیکه بخش فوق روان در جهت عکس بحرکت در میاید. مقدار هلیوم در هر نقطه ثابت میماند، ولی بعلت توام بودن انتقال گرما با حرکت بخش عادی هلیوم، پره در اثر اصطکاک گرانرو با آن منحرف شده و تا زمانی که گرمایش هلیوم ادامه دارد در حالت انحراف باقی میماند.

از عدم گرمارسانائی حرکت فوق روان نتیجه دیگری نیز حاصل میشود. قبلاً در باره بیرون «خزیدن» هلیوم از لبه استکان سخن بمیان آمد. اما فقط جزء فوق روان است که از استکان بیرون «میخزد» و جزء عادی بر جای میماند. از آنجا که انتقال گرما تنها به جزء عادی هلیوم مربوط است و با جزء فوق‌روان و «فرار» آن همراه نیست، بتدریج که هلیوم از لبه ظرف خارج میشود، گرما بمقدار کمتری هلیوم میرسد و بنابراین بر دمای هلیوم باقیمانده بایستی افزوده گردد. این درست همان پدیدهای است که در حین آزمایش مشاهده میشود.

اجرام هلیوم مربوط به حرکت فوق روان و عادی از هم متفاوتند. نسبت بین آنها به درجه حرارت مربوط است. هر چه درجه حرارت پائین‌تر رود جزء فوق روان هلیوم رو به افزایش میگذارد، تا اینکه بالاخره در صفر مطلق تمام هلیوم فوق روان میشود. همزمان با ارتقاء درجه حرارت مقدار هر چه بیشتری از هلیوم بحالت عادی در میآید و بمحض رسیدن به ۲٫۱۹°K تماماً به کیفیت عادی در میآید و واجد خواص مایعات عادی میگردد.

پس از آشنائی با مطالب بالا لابد خواننده میخواهد بپرسد: هلیوم فوق روان دیگر چه مقوله‌ای است؟ چگونه ذره‌ی مایع میتواند در آن واحد در دو حرکت شرکت کند؟ و چگونه میتوان واقعیت دو حرکت همزمان یک ذره را تعبیر نمود؟ متاسفانه ما ناگزیر در اینجا همه این پرسش‌ها را بدون پاسخ میگذاریم. تئوری هلیوم ۲ بسیار دشوار و فهم آن مستلزم اطلاعات بسیار وسیع است.

نرمش

کشسانی عبارتست از قابلیت جسم به احیاء شکل خود پس از پایان‌یافتن تاثیر نیرو. اگر وزنه یک کیلوگرمی را به مفتولی فولادین با مقطع $1\,mm^2$ بیاویزیم مفتول کش خواهد آمد. کشش ناچیز و تنها باندازه ۰٫۵ میلیمتر است، اما بسادگی میتوان آنرا نشان کرد. حال اگر وزنه را جدا کنیم باز مفتول بهمان اندازه نیم میلیمتر منقبض شده و نشانه بجای اولیه خود باز میگردد. اینگونه تغییر شکل را کشسان مینامند.

بایستی خاطر نشان ساخت که مفتول‌دارای مقطع یک میلیمتری و تحت تاثیر نیروی یک کیلوگرمی با مفتول‌دارای مقطع یک سانتیمتری که تحت تاثیر نیروی صدکیلوگرمی قرار گرفته باشد از لحاظ باصطلاح تنش مکانیکی در وضع یکسانی قرار دارند. از اینرو خواص مواد مختلف را نه با ذکر نیرو (که اگر مقطع معلوم نباشد گویا نیست) بلکه بوسیله تنش که عبارت از نیروی وارد بر واحد سطح است بایستی مشخص ساخت. اجسام عادی مانند فلزات، شیشه و انواع سنگها

ن حالت تنها تا چند در صد بطور کشسان میتوان انبساط
واجد خواص کشسانی ممتازی است و میتوان آنرا تا چند صد
، داد(یعنی درازی آنرا دو یا سه چندان نمود). پس از رها
ک دو باره بحالت اولیه خود باز میگردد.

ثناء همه اجسام تحت تاثیر نیروی کم، حالت کشسانی
حد کشسانی به تفاوت برای برخی از اجسام زودتر و
دیگر بطور قابل ملاحظه‌ای دیرتر فرا میرسد. مثلاً برای
مانند سرب با آویختن وزنه ۰٫۲ الی ۰٫۳ کیلوگرمی به
، یک میلیمتری حد کشسانی فرا میرسد. در حالیکه برای
چون فولاد این حد تقریباً صد بار بالاتر و نزدیک به
م است.

فتلف را بسته به واکنش آنها در مقابل نیروی فراتر از
میتوان بدو گروه مشخص تقسیم نمود. یک گروه شامل اجسام
نند شیشه بوده و گروه دیگر اجسام با نرمش مانند رست
میگیرد.

شت خود را به تکه خمیری از خاک رس بفشاریم اثر
ماند، حتی شیارهای پیچیده پوست انگشت ما نیز بر سطح
میبندد. چکش نیز با ضربه محکم به آهن نرم ویا سرب
ی بر جای میگذارد. در اینجا پس از ناپدیدشدن نیروی
تغییر شکل باقی میماند. این نوع تغییر شکل را پلاستیک
می‌خوانند. اینگونه علائم ماننده را روی شیشه نمیتوان
، در صورت سماجت در این راه شیشه خرد خواهد شد.
ت و همبسته ها (آلیاژها)، ازجمله چدن نیز همینطور زود
ضربه‌ی پتک سطل آهنین له میشود ولی دیگ چدنی

ارقام زیر در باره استحکام اجسام شکننده میتوان داوری
تبدیل قطعه‌ای چدن بگرد بایستی در حدود ۵۰ تا ۸۰
هر میلیمتر مربع آن فشار وارد آورد. در مورد آجر این
الی ۳ کیلوگرم تجاوز نمیکند.

، اجسام به شکننده و پلاستیک مثل هر طبقه بندی
زیادی مشروط است. قبل از هر چیز بایستی متذکر شد

که یک جسم که در درجات گرمای پائین شکننده است با افزایش دما ممکنست بحالت پلاستیک در آید. شیشه را با گرمایش چند صد درجه میتوان مثل ماده‌ای پلاستیک عمل آوری کرد.

فلزات نرم مثل سرب را میتوان در حالت سرد کوبید، در حالیکه کوفتن فلزات سخت تنها در درجات بالای حرارت و گداختگی امکان پذیر است. افزایش دما خاصیت پلاستیک مواد را بشدت ارتقاء میبخشد.

یکی از خواص ممتاز فلزات که آنها را بصورت مصالح ساختمانی بی رقیبی در آورده است سختی آنها در حرارت معمولی و پلاستیک بودنشان در دماهای بالا است. فلز گداخته را بسهولت میتوان بشکل دلخواه در آورد، در حالیکه تغییر شکل آن در حرارت عادی اطاق تنها با کاربرد نیروی بسیار زیاد میسر میگردد.

ساختمان درونی مواد روی خواص مکانیکی آنها تاثیر بسزائی دارد. روشن است که ترک خوردگیها و خلل و فرجها در جسم استحکام آنرا تقلیل داده و آنرا شکننده‌تر میسازند.

گرایش به استحکام از خواص بارز اجسامی است که بطور پلاستیک تغییر شکل میدهند. تک بلور فلز که تازه از ماده گداخته روئیده است، بسیار نرم است. بلورهای بسیاری فلزات بحدی نرمند که با انگشت میشود آنها را خم کرد ولی... راست کردن چنین بلوری ممکن نیست. چون جریان استحکام آن صورت گرفته است. حالا دیگر تغییر شکل پلاستیک آن تنها با صرف نیروی خیلی زیاد ممکن است. از قرار معلوم نرمش نه تنها خاصیت ذاتی ماده بوده، بلکه با نحوه عمل آوری آن نیز بستگی دارد.

چرا ابزار فلزی را نه ازراه ریخته گری بلکه بوسیله کوفتن تهیه میکنند؟ علتش روشن است. فلزی که در معرض کوفتن (نورد ویا کشش) قرار گرفته باشد بسیار سخت‌تر از فلز ریخته شده است.

هر قدر فلزی را بکوبیم باز هم استحکام آن از حد معینی که حد سیلان نامیده میشود فراتر نخواهد رفت. برای فولاد این حد بین ۳۰ تا ۵۰ kgf/mm^2 میباشد.

معنی این رقم از اینقرار است: اگر به سیمی با مقطع یک میلیمتر مربع وزنه‌ی یک پوتی آویزان کنیم (کمتر از حد سیلان)، سیم شروع به کش آمدن میکند و در عین حال بر استحکام آن نیز افزوده میشود.

گشش سیم بزودی متوقف میگردد و وزنه از حرکت باز
ال اگر بهمین سیم یک وزنه دو یا سه پوتی آویخته شود
حد سیلان) منظره دیگری بچشم خواهد خورد. سیم بدون
ه میشود (به سیلان در میآید) تا اینکه بالاخره پاره میشود.
تاکید میکنیم که خواص مکانیکی اجسام با تنش معین میگردد
رو. مثلا سیم‌دارای مقطع ۱۰۰ میکرون مربع تنها تحت تاثیر
نا پنج گرمی بسیلان در خواهد آمد.

سختی

و استحکام همیشه پا بپای هم پیش نمیروند. طناب نخی،
ریسمان ابریشمی ممکن است دارای استحکام خیلی زیادی
رای پاره کردنشان تنش قابل ملاحظه‌ای لازم باشد. اما
ن که هیچکس نخواهد گفت که ریسمان ویا ماهوت مواد
نند. و بر عکس استحکام شیشه زیاد نیست، در حالیکه
یشه ماده‌ای سخت است.
سختی بدانشکل که در تکنیک بکار برده میشود از پراتیک
مره گرفته شده است. سختی یک جسم واکنشی است که
در مقابل فرو رفتن اجسام خارجی در خود نشان میدهد.
خت می‌گویند اگر خراشاندن و نقش نهادن بر آن مشکل
تعاریف ممکن است بنظر خواننده تا حدی مبهم جلوه کنند.
کرده‌ایم که مفاهیم فیزیکی را در قالب ارقام و اعداد
یم. ببینیم در مورد سختی چگونه میتوان به این کار دست

دی شیوه‌ای است کاملاً ابتدائی و در عین حال دارای ارزش
دتها است که از طرف کان شناسان مورد استفاده قرار میگیرد. ده
ن معین را در یک ردیف قرار میدهند. در این ردیف
س، کروند یا قوت زرد، کوارتز، فلد سپات، اپاتیت، فلوئورین،
گچ و طلق جای گرفته‌اند. جای این سنگها در ردیف بر
انتخاب شده است که الماس تمام سنگهای معدنی را میتراشد

در حالیکه هیچکدام از سنگهای فوق الذکر قادر بتراشیدن الماس نیستند، لذا الماس سخت‌ترین سنگ معدن است. سختی الماس را با رقم ده مشخص میسازند. پس از الماس کروند که سخت‌تر از مابقی و قادر بخراشاندن آنهاست با عدد ۹ نشان داده میشود. یاقوت زرد، کوارتز و فلدسپات بهمین ترتیب با اعداد ۸ و ۷ و ۶ مشخص میگردند. هر کدام از این سنگها سخت‌تر از سنگهای معدنی مادون خود بوده (یعنی قادر بخراشانیدن آنها هستند) و نرم‌تر از سنگهای مافوق خود در ردیف میباشند (یعنی بوسیله آنها خراشیده میشوند). سختی طلق که نرم‌ترین سنگ معدنی است با رقم یک نشان داده میشود.

«اندازه‌گیری» (ما ناگزیر آنر ادر گیومه میگذاریم) سختی بکمک این درجه بندی عبارتست از تعیین جای سنگ مورد نظر در این ردیف ده‌گانه استانداردهای برگزیده. مثلا، اگر سنگه معدنی ناشناسی بوسیله کوارتز خراش بر دارد و در عین حال بتواند بر سطح فلدسپات خراش وارد آورد، سختی آن با رقم ۶٫۵ سنجیده میشود.

فلزشناسان برای تعیین سختی از شیوه دیگری استفاده میکنند. با واردآوردن نیروی استانداردی (معمولا ۳۰۰۰ کیلوگرم) بر گوئی فولادین بقطر یک سانتیمتر روی ماده مورد آزمایش فرو رفتگی ایجاد میکنند. شعاع فرو رفتگی ایجاد شده بعنوان رقم بیانگر سختی ماده پذیرفته میشود.

* سختی در مقابل خراش پذیری و سختی در برابر فشار همیشه با هم تطابق ندارند. ممکنست ماده‌ای نسبت به ماده دیگر از لحاظ خراش‌پذیری سخت‌تر، ولی از جهت فشارپذیری نرمتر باشد.

بدین ترتیب مفهوم عام سختی مستقل از شیوه اندازه گیری وجود ندارد و آنرا باید به مفاهیم فنی منسوب دانست نه فیزیکی.

صوت

نوسانهای صوتی

ما تا کنون مطالب زیادی در باره نوسانها باطلاع خوانندگان رسانیدیم. آونگ، گلوله روی فنر چگونه نوسان میکنند؟ قانونمندیهای ارتعاش سیم عبارت از چیست؟ فصل پنجم کتاب به این مسائل اختصاص داشت. ولی ما نگفتیم که وقتی جسم واقع در هوا یا در محیطی دیگر، نوسان میکند، در هوا یا در آن محیط چه روی میدهد. تردیدی نیست که محیط نمیتواند درمقابل نوسانهائی که در آن روی میدهد خالی از تاثیر بماند. جسم در حال نوسان هوا را بحرکت در میآورد و ذرات آنرا از وضعی که قرار داشتند خارج میسازد و جابجا میکند. این هم معلوم است که موضوع فقط به تاثیر روی قشر بلافاصله نزدیک هوا محدود نمیشود. جسم قشر مجاورش را میفشارد، این قشر قشر بعدی را تحت فشار قرار میدهد، و باین ترتیب با انتقال فشار از قشری به قشر دیگر، از ذره‌ای به ذره‌دیگر، همه هوای محیط به حرکت در میآید. در این صورت ما میگوئیم که هوا بحال ارتعاش در آمده و یا اینکه در هوا ارتعاشهای صوتی پدید آمده‌اند.

ما ارتعاشات محیط را صوتی مینامیم، ولی این به آن معنا نیست که همه ارتعاشهای صوتی را ما میشنویم. در فیزیک از مفهوم ارتعاشات صورتی بصوت گسترده تری استفاده میشود. کدام ارتعاشات صوتی را ما میشنویم؟ در این مبحث ما از این مقوله سخن خواهیم گفت.

در اینجا صحبت از هوا بدانجهت بمیان میآید که صدا بیشتر اوقات بوسیله هوا انتقال مییابد. ولی البته هوا از هیچ خاصیت ویژه‌ای

برخوردار نیست که حق ایجاد ارتعاشهای صوتی را به انحصار خود درآورد. ارتعاشهای صوتی در هر محیطی که قابل انقباض و تراکم باشد ایجاد میشوند، و چون جسم غیرقابل تراکم در طبیعت وجود ندارد، بنابراین ذرات هر مادهای میتوانند در این شرایط قرار گیرند. آموزش مربوط به این ارتعاشات را معمولاً آکوستیک مینامند.

در ارتعاشهای صوتی هرذره هوا بطور متوسط در جای خود میماند و فقط در حول وضع تعادلش نوسان میکند. درسادهترین حالت ذره هوا میتواند نوسان موزونی انجام دهد که بطوریکه در پیش گفته شد، بموجب قانون سینوس صورت میگیرد. این نوسان با حداکثر تغییر مکان از وضع تعادل یا دامنه (آمپلیتود) و دوره نوسان، یعنی زمان صرف شده برای انجام یک نوسان کامل مشخص میگردد.

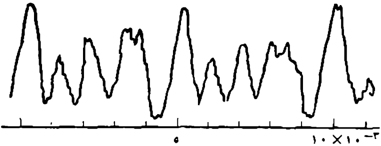
برای توضیح خواص ارتعاشهای صوتی غالبا از مفهوم بسامد نوسان استفاده میشود، نه از دوره نوسان. فرمول بسامد $\gamma = \frac{۱}{T}$ کمیتی است عکس دوره. واحد بسامد ثانیهی معکوس ($sec^{-۱}$) است. اگر بسامد نوسان برابر ۱۰۰ $sec^{-۱}$ باشد، یعنی ذره هوا درظرف مدت یک ثانیه ۱۰۰ نوسان کامل انجام خواهد داد. بجای اینکه بگوئیم: «۱۰۰ ثانیه معکوس». میتوان گفت «۱۰۰ هرتز» (Hz) یا «۱۰۰ سیکل». چون در فیزیک غالبا با بسامدهای بمراتب بزرگتر از یک هرتز سروکار پیدا میشود، واحدهای کیلوهرتز (کیلو سیکل) و مگاهرتز (مگا سیکل) بصورت گستردهای مورد استفاده قرار میگیرند.

$$۱\ kHz = ۱۰^{۳}\ Hz$$

$$۱\ mgHr = ۱۰^{٦}\ Hz$$

سرعت ذره در حال نوسان در حین عبور از حالت تعادل بحد اکثر است. و برعکس، در حالات نهائی تغییر مکان نوسانی این سرعت برابر صفر میشود. گفتیم که اگر تغییر مکان نوسانی ذره تابع قانون نوسان موزون باشد، تغییر سرعت نوسان نیز از همان قانون پیروی خواهد کرد. اگر میدان تغییر مکان نوسانیرا با $s_{۰}$ و سرعت نوسان را با v نشان دهیم،

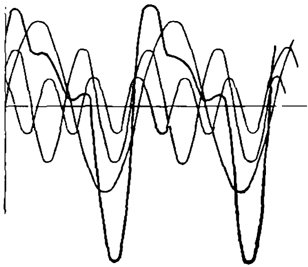
$$v_{۰} = ۲\pi v S_{۰} \quad \text{ویا} \quad v_{۰} = ۲\pi \frac{S^{۰}}{T}$$



شکل ۱۱٤

خواهد شد. حرف زدن بصدای بلند ذرات هوا را با میدان نوسانی برابر فقط چند میلیونیم سانتیمتر به نوسان در میآورد. مقدار میدانی سرعت، رقمی حدود ۰٫۰۲ cm/sec خواهد بود.

یک کمیت مهم فیزیکی دیگر که همراه تغییر مکان و سرعت ذره نوسان میکند، فشار اضافی است که آنرا فشار صوتی نیز مینامند. نوسان صوتی هوا عبارتست از تناوب دوره‌ای انقباض و انبساط در هر نقطه‌ی محیط. فشار هوا در هر نقطه گاه بیشتر و گاه کمتر از فشاریست که در آن نقطه پیش از ایجاد صدا وجود داشت. این افزایش (ویا کاهش) فشار همانا فشار صوتی است. فشار صوتی سهم خیلی کوچکی از فشار عادی هوا را تشکیل میدهد. در مثال ما یعنی برای صدای بلند، میدان فشار صوتی تقریبا برابر یک میلیونیم آتمسفر است. فشار صوتی مستقیما با سرعت نوسان ذره متناسب است، ضمنا نسبت این کمیت‌های فیزیکی فقط و فقط به خواص محیط بستگی دارد. مثلا فشار صوتی بمیزان ۱ دین بر سانتیمترمربع در هوا با سرعت نوسان ۰٫۰۲۵ سانتیمتر در ثانیه مطابق است.


شکل ۱۱۵

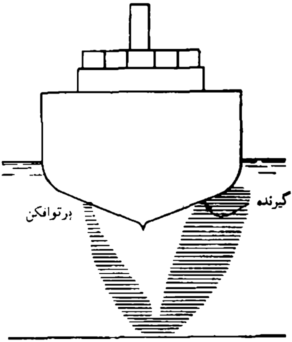
سیمی که برطبق قانون سینوس نوسان میکند، ذرات هوا را نیز به نوسان موزون وامیدارد. همهمه و اصوات موسیقی مرکب منظره خیلی بغرنج تری بوجود میآورند. در شکل ۱۱۴ ثبت نوسانهای صوتی و هم چنین فشار صوتی بر حسب زمان نشان داده شده است. این منحنی به سینوسوئید شباهت کمی دارد. ولی معلومست که هر نوسانی‌را هرقدر هم مرکب باشد، میتوان بعنوان منتجه و ترکیب تعداد زیادی سینوسوئیدهای با میدانها و بسامدهای مختلف در نظر گرفت. این نوسانهای ساده با صطلاح طیف نوسان مرکب را تشکیل میدهند. یک نمونه‌ی ساده‌ی اینگونه ترکیب و جمع نوسانها در شکل ۱۱۵ نشان داده شده است.

سرعت صوت

لابد شما شنیده اید که هیچ‌وقت نباید از شنیدن صدای رعد بعد از مشاهده‌ی برق بوحشت بیفتید. ولی چرا؟ بعلت اینکه نور بطرز غیر قابل مقایسه ای سریعتر از صوت پخش میشود — و میتوان گفت که پخش نور عملا آنی صورت میگیرد. رعد و برق در یک لحظه واحد وقوع مییابند، ولی برق را ما در لحظه‌ی وقوعش میبینیم در صورتیکه صدای رعد با سرعت تقریبا یک کیلومتر در سه ثانیه به گوش ما میرسد (سرعت صوت در هوا ۳۳۰ متر در ثانیه است). بنابراین وقتی صدای رعد شنیده میشود باید دانست که خطر ضربت برق دیگر رفع شده است.

با دانستن سرعت انتشار صوت معمولا میتوان معین کرد که رعد و برق در چه فاصله‌ای از ما صورت گرفته است. اگر از لحظه‌ی درخشش برق تا شنیدن صدای ترکش رعد ۱۲ ثانیه طول بکشد معلوم میشود که رعد و برق در فاصله ٤ کیلومتری روی داده است.

سرعت صوت درگازها تقریبا برابر سرعت متوسط حرکت ملکولهای گاز است. این سرعت به چگالی گاز بستگی ندارد و با ریشه درجه دوم حرارت مطلق متناسب است. مایعات صدارا سریعتر از گازها هدایت میکنند. در آب صدا با سرعت ۱٤۵۰ متر در ثانیه، یعنی ٤٫۵ بار



شکل ۱۱۶

سریعتر از هوا انتشار میباید. سرعت صوت در اجسام جامد از آنهم زیادتر است. ازجمله مثلا در آهن حدود ۶۰۰۰ متر در ثانیه است.

وقتی صدا از محیطی داخل محیط دیگر میشود، سرعت انتشار آن تغییر میکند. ولی در عین حال پدیده‌ی جالب دیگری نیز روی میدهد و آن انعکاس بخشی از صدا در مرز بین دو محیط است. کمیت بخشی که انعکاس میبابد، بطور عمده به نسبت چگالیهای دو محیط بستگی دارد، در صورتیکه صدا از هوا به سطوح جامد یا مایع بر خورد کند و یا برعکس، از محیطهای سخت داخل هوا شود، تقریبا بطور کامل انعکاس میبابد. ولی وقتی صدا از هوا به آب ویا برعکس، از آب به هوا بتابد، در اینصورت فقط $\frac{1}{1000}$ صدا به محیط دوم نفوذ میکند. اگر هر دو محیط متراکم باشند، نسبت بین بخش نافذ به‌بخش انعکاس یافته‌ی صدا ممکنست زیاد هم نباشد. بعنوان مثال متذکر میگردیم که در انتقال صدا از آب به فولاد یا برعکس، از فولاد به آب ۱۳ در صد آن نفوذ میکند و ۸۷ درصد انعکاس میبابد.

پدیده‌ی انعکاس صوت در ناوبری مورد استعمال گسترده‌ای دارد. ساختمان وسیله اندازه‌گیری ژرفای آب — اکولوت یا ژرفایاب صوتی — بر این پایه نهاده شده است (شکل ۱۱۶). منبع صدا را در یکی از پهلوهای کشتی زیر آب جا میدهند. صدای بریده و منقطع، شعاعهای صوتی بوجود میآورد که به ژرفای آب تا ته دریا یا رودخانه نفوذ میکنند و از آنجا انعکاس یافته، بخشی از صدا به کشتی باز میگردد که با دستگاههای حساس آنرا میگیرند. ساعت دقیق نشان میدهد که

صدا این راه‌را در چه مدت زمانی پیموده است. سرعت در آب معلوم است، بنابراین با یک محاسبه ساده میتوان ژرفای مطلوب را بادقت بدست آورد.

اگر صدا را بجای هدایت به پائین به جلو یا به اطراف روانه کنیم با کمک آن میشود تعیین کرد که آیا نزدیک کشتی صخره‌های زیرآبی خطرناک یا کوههای یخی که به عمق آب فرو رفته اند هست یا نه.

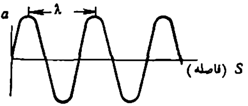
موج صوتی

اگر صوت بطور آنی انتشار مییافت، همه‌ی ذرات هوا یکدفعه، مثل مجموعه‌ای واحد، بنوسان در میآمدند. ولی صوت بطور آنی انتشار نمی‌یابد، و احجام هوا که در خط انتشار قرار دارند، بنوبه، بمحض اینکه موج برخاسته از منبع صدا آنها را فرا گیرد، بحرکت در میآیند. درست مثل باریکه‌ی چوبی است که تا موقعیکه امواج دایروی حاصله ازپرتاب سنگریزه‌ای در آب به آن برسد و آنرا به نوسان در آورد ساکن و آرام روی آب قرار دارد.

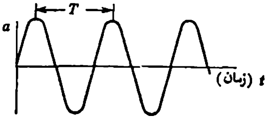
اکنون یک ذره درحال نوسان‌را مورد توجه قرار میدهیم و وضع آنرا باحرکت دیگر ذرات واقع بر روی همان خط انتشار صدا مقایسه میکنیم. ذره‌ی مجاور کمی دیرتر به نوسان در میاید، و ذره‌ی بعدی از آنهم دیرتر. این تاخیر تا لحظه‌ای که ما به ذره‌ای که بقدر یک دوره کامل عقبتر است و باینجهت با همان آهنگ ذره‌ی مبدأ نوسان میکند نرسیده‌ایم، مرتب افزایش مییابد. این درست بدان میماند که دونده‌ی ناموفقی که باندازه‌ی یکدور کامل عقب مانده است، میتواند با برنده‌ی مسابقه در یکزمان بخط فینال برسد. درچه فاصله‌ای ما به نقطه ای که هماهنگ با نقطه‌ی مبدأ نوسان میکند بر خورد خواهیم کرد؟ تصور این مساله دشوار نیست که فاصله‌ی مزبور λ برابر است با حاصلضرب سرعت انتشار صوت c در دوره‌ی نوسان T. فاصله λ را طول موج مینامند.

$$\lambda = cT$$

درهر فاصله λ ما به نقاطی هماهنگ برخورد میکنیم.



شکل ۱۱۷



شکل ۱۱۸

حرکت نقاط متوالی واقع در فواصل $\frac{\lambda}{۲}$ نسبت به یکدیگر همانند حرکت شیئی در حال نوسان عمود بر آینه است نسبت به تصویرش.

اگر تغییر مکان (یا سرعت ویا فشار صوتی) کلیه نقاط واقع بر روی خط انتشار صوت موزونی را ترسیم کنیم، باز هم یک سینوسوئید بدست خواهد آمد.

لازم بتذکر است که نباید نمودارهای حرکت موجی و نوسانهارا با هم اشتباه کرد. اشکال ۱۱۷ و ۱۱۸ خیلی بهم شبیهند، ولی در نمودار اول روی محور افقی فواصل برده شده‌اند، در صورتیکه در نمودار دوم محور افقی نمایشگر زمان است. یک منحنی نمایشگر گسترش نوسان برحسب زمان است، و منحنی دیگر «عکسی» است از موجی در یک آن. از مقایسه‌ی این دو منحنی مشاهده میگردد که طول موج را میتوان همچنین دوره‌ی فضائی نامید: نقش T در زمان‌را مقدار λ درمکان بازی میکند.

در منحنی موج صوتی، تغییر مکانهای ذره روی محور قائم برده شده و جهت انتشار موج که فواصل در طول آن حساب میشوند، محور افقی است. این حالت ممکنست چنین تصور نادرستی بوجود آورد که ذرات عمود برجهت انتشار موج تغییر مکان میدهند. در حقیقت ذرات هوا همیشه در طول جهت انتشار صوت نوسان میکنند. این موج‌را موج طولی مینامند.

صدای قابل شنیدن

چه نوسانات صوتی‌را انسان با قوه‌ی شنوائی درک میکند؟ بطوریکه معلوم گشته است، گوش انسان فقط نوسانهائی را که تقریبا درفاصله‌ی

از ۲۰ تا ۲۰۰۰۰ هرتز قرار دارند، حس میکند. اصوات با بسامد زیاد را بلند و با بسامد کم را کوتاه میگویند.

حدود بسامدهای قابل شنیدن با چه طول موجهائی مطابقت دارند؟ از آنجا که سرعت صوت تقریبا ۳۰۰ متر در ثانیه است، از فرمول $\lambda = cT = c/v$ بدست میآید که طول موجهای صوتی قابل شنیدن در حدود از ۱۰ متر برای پا ئینترین تا ۳ سانتیمتر برای بلندترین صداها قرار دارند.

این نوسانات را ما چگونه «میشنویم»؟

باید بگوئیم که کار عضو شنوائی تا کنون بطور کامل روشن نشده است. در گوش داخلی (در حلزون گوش که کانالی بطول چند سانتیمتر پر از مایع است) چندین هزار عصب حساس وجود دارند که قادرند نوسانهای صوتی‌را که از هوا از راه پرده‌ی طبله به حلزون منتقل میشوند درک کنند. برحسب بسامد جریان، این و یا آن بخش حلزون بیشتر بنوسان میآید. گرچه اعصاب حساس در طول حلزون آنقدر نزدیک بهم‌اند که یکدفعه تعداد زیادی از آنها متاثر میشوند، معذلک انسان (حیوانات هم) قادر است — بویژه در کودکی — تغییرات بسیار ناچیز بسامد (تا اجزاء هزارم آن) را تشخیص‌دهد. این عمل بچه نحو صورت میگیرد، تا کنون دقیقا معلوم نیست. چیزیکه مسلم است اینکه در اینجا آنالیز تحریکات وارده از بسیاری عصبهای جداگانه در مغز مهمترین نقش‌را بازی میکند. تاکنون دانشمندان موفق نشده اند نمونه‌ی مکانیکی اختراع کنند که با همان ترکیب ساختمانی بتواند بخوبی گوش انسان بسامد صوت را تشخیص دهد. بعضی اشخاص دارای قوه‌ی شنوائی مطلقند: در پیانو آکورد مرکبی را بصدا در آورید، شنونده خواهد گفت که شما روی چه پرده‌هائی نواخته‌اید. یعنی گوش شنونده قادر است یک صدای مرکب‌را به اجزاء مرکبه‌ی موزونش تجزیه کند.

موسیقی

تفاوت صدای موسیقی از همهمه و هیاهو توسط منحنی‌های فشار صوتی نشان داده شد. یک نوای (تن) ساده‌ی موسیقی از نوسان متناوب

بسامد معینی بوجود میآید. صداهای مرکب ترکیبی است از پرده های خالص.

ارکستر نوازندگان تقریبا همه بسامدهای قابل شنیدن را بکار میبرد. میدان نواهای پیانو بسامدهای تقریبا از ۲۵ تا ۴۰۰۰ هرتز را دربر- میگیرد.

همه ترکیبات اصوات بگوش خوشایند نیستند. از قرار معلوم، صداهائی احساس مطبوع بر میانگیزند که بسامدهای نوسانات آنها نسبتهای ساده‌ای را تشکیل دهند. اگر بسامدهای صوتی به نسبت ۲ به ۱ باشند اکتاو است، اگر ۵ به ٤ باشند ترسیای بزرگ است، نسبت ٤ به ۳ کوارتا و ۳ به ۲ کوینتا است. اگر بسامدهای نوسانات صوتی را نتوان با نسبتهای ساده‌ی نامبرده عرضه داشت، احساس خوشایندی صدا از بین میرود. این حالت را نوازندگان ناهماهنگی (دیسونانس) مینامند. گوش درهم آمیزی صداهای گونا گون‌را خوب حس میکند. از اینرو مردمانی که حتی دارای شنوائی متوسط میباشند نیز نسبت به دیسونانس حساسند.

در آلات موسیقی از نوع ویولن که برخلاف پیانو فاقد پرده‌های ضربتی است، نوازنده میتواند هر نوائی را بگیرد و هرگونه ترکیب نواهارا بوجود آورد.

ولی در آلات موسیقی نظیر پیانو نوعی دیگر است. سیمهای پیانو برای بسامدهای معین تنظیم شده‌اند. نواختن روی پرده ضربتی نمیتواند نوای صدا را تغییر دهد. پرده‌های ضربتی پیانو متضمن هفت اکتاو کاملند. «دو» پائینی صدائی با بسامد ۳۲,٦٤ هرتز را میدهد و «دو» بالائی ــ با بسامد هرتز ٤۱۷۸ ≈ ۲۷×۳۲,٦٤ مساله بر سراینست که چطور باید اکتاوها را تقسیم کرد، یعنی چه صداهای بینابینی باید بوجود آورد که پاسخگوی دو شرط باشند: اول اینکه بسامدها درحالت نسبتهای حتی‌الامکان ساده قرار داشته باشند. دوم اینکه اکتاوها بفواصل مساوی (نسبتهای بین بسامدها) تقسیم شوند، زیرا فقط در این حالت است که میتوان آهنگ واحدی را با آغاز از هر نت اکتاو (همان آهنگ با صدای دیگر) نواخت. ولی این دو شرط در واقع با هم در تضاد میباشند. با استفاده از باصطلاح ساختمان شدید میتوان این شروط را تقریبا تامین کرد.

ببینیم اگر اکتاو را به ۱۲ فاصله‌ی برابر تقسیم کنیم چه از آب در میآید. هریک از این فواصل برابر $۲^{\frac{۱}{۱۲}}=۱,۰۵۹$ خواهد شد. این بدانمعناست که نسبت دو صدای مجاور مساوی این رقم خواهد بود.

حالا ارقام زیر را مینویسیم:

۱) $۲^{\frac{۱}{۱۲}}=۱,۰۵۹$
۲) $۲^{\frac{۲}{۱۲}}=۱,۱۲۲$
۳) $۲^{\frac{۳}{۱۲}}=۱,۱۸۹$
۴) $۲^{\frac{۴}{۱۲}}=۱,۲۶۰$
۵) $۲^{\frac{۵}{۱۲}}=۱,۳۳۵$
۶) $۲^{\frac{۶}{۱۲}}=۱,۴۱۴$
۷) $۲^{\frac{۷}{۱۲}}=۱,۴۹۸$
۸) $۲^{\frac{۸}{۱۲}}=۱,۵۸۷$
۹) $۲^{\frac{۹}{۱۲}}=۱,۶۸۲$
۱۰) $۲^{\frac{۱۰}{۱۲}}=۱,۷۸۲$
۱۱) $۲^{\frac{۱۱}{۱۲}}=۱,۸۸۸$
۱۲) $۲^{\frac{۱۲}{۱۲}}=۲$

نوازنده با خرسندی کامل مشاهده میکند که با این حساب ساده مشکل او حل میشود: اکتاو به فواصل دقیقا برابر تقسیم شده است و درعین حال نسبتهای بسیاری از صداها به نسبتهای ارقام ساده خیلی نزدیکند. ما در اینجا هم کوینتا (۷) را میبینیم، هم کوارتا (۵) را و هم ترسیای بزرگ (۴) را، چون تقریبا $\frac{۳}{۲}\approx ۱,۴۹۸$؛ $\frac{۵}{۴}\approx ۱,۲۶۰$ و $\frac{۴}{۳}\approx ۱,۳۳۵$ میبا شند. در دیگر موارد هم که تفاوت از ۱ درصد تجاوز نمیکند، بسیار خوبست: $\frac{۷}{۵}\approx ۱,۴۱۴$؛ $\frac{۹}{۸}\approx ۱,۱۲۲$؛ $\frac{۸}{۵}\approx ۱,۵۸۷$؛ $\frac{۵}{۳}\approx ۱,۶۸۲$؛ $\frac{۱۷}{۹}\approx ۱,۸۸۸$، فقط فاصله‌ی اول $\frac{۱۸}{۱۷}\approx ۱,۰۹۵$ دارای دیسونانس آشکار است.

انحرافهای کوچک از ساخت خالص (یعنی ساختی که نسبتهای بسامدها در آن دقیقا برابرنسبت اعداد صحیح باشند) برای قوه‌ی

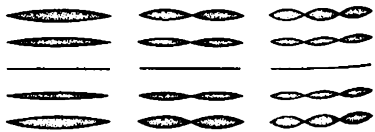
شنوائی خیلی کم قابل تشخیص‌اند و بهمین جهت ساخت شدید پیانو انتشار گسترده‌ای یافته است.

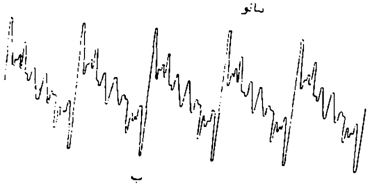
آهنگ صدا

(شما لابد دیده‌اید که چگونه تار یا گیتار را کوک میکنند، یعنی بوسیله‌ی کوکها کشش سیمهارا تغییر میدهند. اگر سیمی با درازا و درجه کشش معین نواخته شود، از آن نوای کاملا معینی شنیده خواهد شد.

ولی اگر انگشتتان را روی نقاط مختلف سیم — وسط، درفاصله‌ی یک چهارم نقطه‌ی اتکا یا در هر نقطه‌ی دیگر قرار دهید، صداهای کاملا متفاوتی از آن خواهید شنید. نوا همان خواهدبود، ولی رنگ صدا ویا باصطلاح نوازندگان آهنگ صدا تغییر خواهد کرد. این حالت عبارت از چیست؟ چه چیز است که به نوای واحد رنگهای مختلف میدهد؟

مساله از اینقرار است که یک سیم واحد میتواند بگونه‌های مختلف بنوسان در آید. در شکل ۱۱۹ چند گونه از نوسانهای ممکن سیم تصویر شده است. نوسان باکمترین بسامد (آنرا بسامد اصلی نیز مینامند) در ستون چپ نشان داده شده است. نقاط انتهائی محکم شده‌اند و نقطه‌ی میانی با دامنه (آمپلیتود) حد اکثر نوسان میکند. برای اینکه خواننده بتواند نوسان تمام سیم را در مجموع، بروشنی تصور کند، چند حالت متوالی آن در شکل تصویر شده است. حالتی هم هست که تمام سیم بطور مستقیم کشیده شده و کلیه‌ی نقاط آن بطور همزمان در وضع تعادل قرار دارند. در ستون وسط نوسانی تقریبا با بسامد مضاعف نشان داده شده است. در این حالت غیر


شکل ۱۱۹



شکل ۱۲۰

از دو نقطه‌ی انتهائی که محکم شده‌اند، نقطه‌ی میانی سیم نیز در وضع سکون قرار دارد. این نقطه‌ی ساکن را گره نوسان مینامند. حد اکثر دامنه‌ی نوسان را نقاطی از سیم که در فواصل $\frac{1}{4}$ از دو انتهای آن قرار دارند خواهند داشت. این نقاط را باصطلاح شکم نوسان میگویند. برای روشن شدن مطلب چند حالت سیم در شکل نشان داده شده است. در این مورد نیز مثل دیگر موارد، کلیه نقاط سیم همزمان از صفر میگذرند.

تصور میرود که دیگر نیازی به توضیح ستون راست نباشد. در این ستون نوسان با بسامد تقریبا سه گانه که دارای دو گره و سه شکم میباشد نشان داده شده است.

سیم برحسب میزان تحریک میتواند با بسامدهای بزرگ‌تر نوسان کند. کلیه‌ی این بسامدها به نوسانات خود سیم مربوطند.

نوسانهای خود سیم، غیر از نوسان اصلی، صداهائی میدهند که آنها را ابرتن مینامند. صدای سیم از صداهای نوای اصلی و ابرتن‌ها تشکیل میگردد. اگر سیم را در نقاط مختلف بنوازیم، طیف گوناگونی از نوسان بوجود میآوریم. مثلا با نواختن وسط سیم، صدای نوای اصلی خیلی قوی خواهد بود. نواختن در فاصله‌ی $\frac{1}{4}$ صدای کامل ابرتون با بسامد مضاعف را خواهد داشت. در مورد نواخت اختیاری، طیف نوسان متضمن ابرتونهای زیادی با قوت مختلف خواهد بود. این ابرتونها هستند که رنگارنگی (آهنگ) صدا را بوجود میآورند.

حالا دیگر مساله‌ی صداهای متفاوت یک نوای واحد که توسط خوانندگان مختلف ایفا میگردد، یا اینکه در پیانو یا در ویولن نواخته میشود، بخوبی روشن‌میگردد. همه‌ی آنها اصوات یک نوای واحدند، ولی با ترکیب مختلف ابرتونها. وهمین است که به صداها رنگ مخصوص میدهد. مثلا دو منحنی در شکل ۱۲۰، ب و آ را با هم مقایسه کنید. اینها منحنی‌های ثبت صدای نوای واحدیست که از کلارنت و پیانو در آمده باشد. ملاحظه میشود که هیچ کدام از دو صوت جزو نوسانهای سینوسوئید ساده نیستند. بسامد اصلی نوسانات در هر دو مورد یکی است و این همان وحدت نوا را بوجود میآورد.

قابلیت گوش انسان به تشخیص نت «دو» در پیانو از همان نت در کلارنت برپایه‌ی تجزیه‌ی صدا به اجزاء مرکبه‌ی موزونش، یعنی به نوای اصلی و ابرتونها مبتنی است.

کلارنت به جرگه‌ی بزرگی از آلات موسیقی بادی تعلق دارد. پس چه نوسانهائی هستند که در این موارد اصواتی با نوای معین و آهنگهای مختلف بوجود میآورند؟ اینها نوسانات ستونهای هوا هستند.

نوازنده‌ی آلت موسیقی بادی از نفس خود مثل خواننده استفاده نمیکند، بلکه همان استفاده‌ای را مینماید که گیتارنواز از انگشتهای دستش میکند. نوازنده‌ی آلت موسیقی بادی فقط ستون هوای لوله‌ی آن‌را بنوسان در میآورد. ولی نوا و آهنگ را او با تغییر طول ستون هوا ایجاد میکند. هوای درون لوله، برحسب طول ستون هوائی، مثل سیم در آلات موسیقی سیمی، با بسامدهای معین بنوسان در میآید.

فرض کنیم شما زیر درختی کنار جاده نشسته و استراحت میکنید و از جلو شما ماشین باری که در آن ارکستری در حال نواختن است بسرعت میگذرد. یا اینکه فرض معکوس آن: شما سوار ماشین از روستائی میگذرید که در آن مراسم جشن و سرور توام با ارکستر موسیقی بر قرار است. در هر دو این حالات چندین قطعه موسیقی از دم گوش شنونده میگذرد. ببینیم، آیا موقعی که ما صدائی را «در حرکت» میشنویم، آن صدا تغییر نمیکند؟

ابتدا مساله را در مورد رانندهای که به ارکستر نزدیک میشود بررسی کنیم. اگر ماشین در خلاف جهت انتشار موج صوتی حرکت میکند، البته واضحست که شمارهی تراکمهای هوا که در واحد زمان بگوش راننده میرسند از حالتی که ماشین سر جایش ایستاده باشد بیشتر خواهد بود.

اگر فرض کنیم که بجای موج صوتی گروهی از ورزشکاران دونده بسوی راننده در حرکت باشند نیز درست همینطور خواهد بود. و برای اینکه تشبیه ما کامل باشد باید فرض کنیم که دوندهها فاصلهی معینی را (مثل طول موج) بین خود حفظ میکنند و با سرعت ثابتی میدوند.

بدیهیست، در اینجا نیز اگر ماشین بسوی دوندهها در حرکت باشد، شمارهی دوندگانی که در یک ثانیه از کنار آن میگذرند، بیشتر از موقعی خواهد بود که ماشین در حرکت باشد. سرعت نسبی ماشین و دوندهها برابر $c+u$ است. هراندازه سرعت نسبی زیاد شده باشد، بهمان اندازه نیز شمارهی دوندگانی که در واحد زمان از کنار ماشین میگذرند بیشتر خواهد بود.

بدینسان نسبت بسامد($\nu_{\text{حرکت}}$) برای ناظر متحرک به بسامد ν برای ناظرثابت با نسبت سرعتها برابر است با:

$$\frac{\nu_{\text{حرکت}}}{\nu}=\frac{c+u}{c}$$

و از آنجا:

$$\nu_{\text{حرکت}}=\nu\left(1+\frac{u}{c}\right)$$

بطوریکه از فرمول بر میآید، اگر ماشین و ارکستر بهم نزدیک شوند بسامد صدا افزایش مییابد. اگر سرعت ماشین ۷۰ کیلومتر در ساعت باشد بسامد صدا ۶ درصد اضافه خواهد شد.

اگر ماشین از ارکستر دور شود، علامت سرعت u را باید تغییر داد. در این مورد حرکت نسبی، بسامد صدا تنزل خواهد یافت. بنابراین وقتی ماشین از جلو ارکستر رد میشود، بسامد صدا بمیزان ۱۲ = ۶×۲ درصد تغییر خواهد کرد. بسامد ۱۰۰ هرتز مثلا بسامد ۱۰۶ یا ۹۴ هرتز شنیده خواهد شد و این تغییر بسامدی برابر نیم پرده است که حتی شنونده ای که از لحاظ موسیقی زیاد وزریده نباشد نیز آنرا حس خواهد کرد. اگر $u = -c$ باشد، یعنی شنونده از منبع صدا باسرعتی برابر سرعت صوت دور میشود و در اینصورت حرکت[7] مساوی صفر است و صدا اصلا شنیده نخواهد شد. اگر سرعت دورشدن از سرعت صوت بیشتر باشد، صدا شنیده خواهد شد و بسامد صدا با افزایش سرعت دورشدن افزایش خواهد یافت. درفرمول علامت منفی پدید میآید، ولی این علامت تاثیر مستقیم ندارد، چون بسامد قدر مثبت است. ولی با پیدایش علامت منفی، خود پدیده بنحوی خصلت معکوس کسب میکند. موقعی که شنونده با سرعتی بیشتر از سرعت صدا دور میشود، یعنی همیشه در پیشروی از صدا پیشی میگیرد، اول از آن صدائی که مثلا یک ثانیه قبل براه افتاده بود، بعد از آنکه دو ثانیه قبل براه افتاده بود، و بعد گوش شنوندهی متحرک به صداهائی که سه، چهار و الخ ثانیه قبل راهی فضا شده بودند میرسد. باین ترتیب کلیهی صداها بترتیب معکوس شنیده خواهند شد.

برمیگردیم به فرمول کلی تغییر بسامد. آیا میشود برای مورد ارکستر متحرک نیز از همان فرمول استفاده کرد؟ البته میشود، ولی بایستی از آن بطور صحیح استفاده شود.

در فرمولی که ما برای ناظر متحرک بدست آوردیم، دوبسامد هست: بسامد صدا در محیط که طبیعتا با بسامد صدائی که شنوندهی ثابت میشنود یا از آلت موسیقی ثابت پخش میگردد مطابق است، و بسامد صدا (حرکت[7]) که با شمارهی نوسانها درثانیه که از جسم

متحرک به هوا منتقل میشود یا اینکه از هوا به جسم متحرک میرسد برابر میباشد.

بدینسان، اگر در مثال اول بسامدهائی که انتشار مییابند و شنیده میشوند بترتیب عبارتند از بسامد محیط ν وبسامد در حرکت (حرکت$^{\nu}$)، در مثال دوم برعکس، بسامدی که شنیده میشود ν و بسامدی که انتشار مییابد (حرکت$^{\nu}$) است.

برای ناظر متحرک $\nu_{\text{ناظر}} = \nu_{\text{منبع}}\left(1 + \frac{u}{c}\right)$

برای منبع متحرک صدا $\nu_{\text{ناظر}} = \frac{\nu_{\text{منبع}}}{1 + \frac{u}{c}}$

در اینجا باید در نظر داشت که سرعت مثبت در حالت اول بهنگام نزدیک شدن و در حالت دوم بهنگام دور شدن منبع از ناظر است.

بآسانی میتوان دید که هر دو فرمول راه مشابهی برای تغییر انتقال بسامد بر حسب سرعت میدهند. مثلا اگر $\frac{u}{c} = ۰٫۲$ باشد، در حالت حرکت ناظر بسوی منبع، بسامد بمیزان ۲۰ درصد افزایش مییابد، در صورتیکه در حالت حرکت منبع بسوی ناظر، بسامد ۲۵ درصد زیاد خواهد شد.

تاکنون ما بدون اینکه بگوئیم چنین فرض کردیم که ارکستر و شنونده در روی خطی منطبق بر جهت پخش صدا حرکت میکنند. اگر شنونده بجای حرکت بسوی ارکستر در حال نواختن از کنار آن بگذرد چه تغییری حاصل خواهد شد؟ واضحست که در اینجا فقط مؤلفه‌ی سرعت ماشین در طول خط پخش صدا حائز اهمیت است. حرکت ناظر در طول جبهه‌ی موج صوتی، یعنی درجهت عمود به سمت پخش صدا نقشی ایفا نمیکند.

همین ملاحظات به حرکت ارکستر نیز مربوط میباشند. در این حالت، ضمن بکار بردن فرمولها باید در نظر داشت که عامل سرعت حرکت که در فرمول هست باید در لحظه‌ی پخش موج صوتی گرفته شود، نه در لحظه‌ی شنیدن آن.

اگر هم ناظر و هم منبع صدا نسبت به هوا در حرکت باشند،

در اینصورت فرمولها متحد میشوند. بسامد صدائی که شنیده میشود برابر است با

$$\nu_{\text{ناظر}} = \frac{1 + \frac{u}{c}}{1 - \frac{v}{c}} \times \nu_{\text{منبع}}$$

که در آن u سرعت ناظر و v سرعت منبع صدا میباشد.
تغییر بسامد صدا در حین حرکت ناظر یا منبع صدا را اثر دو پلر مینامند.

انرژی صدا

کلیه اجزاء هوا که جسم صدا دهنده یا منبع صدا را احاطه میکنند، در حالت نوسان قرار دارند. بطوریکه در فصل پنجم توضیح دادیم هر نقطه مادی که بموجب قانون سینوس نوسان میکند دارای انرژی کامل معین وثابتی است.
وقتی که نقطه‌ی در حال نوسان از وضع تعادل میگذرد، سرعت حد اکثر را دارا میباشد. چون در این لحظه تغییر مکان نقطه مساوی صفر است، بنابراین تمام انرژی بصورت انرژی سینتیک در میآید.

$$E = \frac{m v^{2}_{\text{حداکثر}}}{2}$$

بنابراین، بطوریکه در صفحه ۱۲۹ شرح داده شد، انرژی کامل با درجه دوم مقدار حد اکثر سرعت نوسان متناسب است.
این قانون در مورد اجزاء هوا که درون موج صوتی نوسان میکنند نیز صادق است. ولی یک جزء هوا چیز نا معینی است و با ینجهت انرژی صدا را با واحد حجم مربوط میکنند. این مقدار را میتوان چگالی انرژی صدا نامید.
از آنجا که جرم واحد حجم عبارتست از چگالی ϱ، پس چگالی انرژی

$$W = \frac{\varrho v^{2}_{\text{حداکثر}}}{2}$$

ما در بالا از کمیت مهم فیزیکی دیگری صحبت کردیم که برطبق قانون سینوس با بسامدی همانند سرعت نوسان میکند. این کمیت — فشار صوتی یا فشار اضافی است. چون این کمیات متناسبند، پس میتوان گفت که چگالی انرژی با مربع مقدار حداکثر فشار صوتی متناسب است.

ما قبلا مقادیر حد اکثر نوسان صوتی را برای گفت‌وگو با صدای بلند آوردیم. حد اکثر سرعت برابر بود با ۰٫۰۲ متر در ثانیه. ۱ سانتیمتر مکعب هوا قریب ۰٫۰۰۱ گرم وزن دارد. بنابراین چگالی انرژی مساویست با

$$\frac{۱}{۲} \times ۱۰^{-۳} \times (۰٫۰۲)^{۲} \frac{\text{ارگ}}{cm^{۳}} = ۲ \times ۱۰^{-۷} \frac{\text{ارگ}}{cm^{۳}}$$

فرض کنیم منبع صدا نوسان میکند و انرژی صوتی به هوای اطراف پخش مینماید. انرژی از جسم صدا دهنده یا منبع صدا گوئی «جاری‌میشود». از هر سطح کوچک عمود بر خط پخش صدا در هرثانیه مقدار معینی انرژی جریان مییابد، این مقدار را جریان انرژی گذشته از سطح مینامند. اگر سطحی بمساحت ۱ سانتیمتر مربع در نظر گرفته شده باشد، مقدار انرژی جریان یافته از آن را شدت موج صوتی نامند.

بآسانی مشاهده میشود که شدت صدا I برابر است با حاصلضرب چگالی انرژی w در سرعت صوت c. حالا استوانه‌ای را در نظر بگیریم که ارتفاع آن ۱ سانتیمتر و سطح قاعده‌ی آن ۱ سانتیمتر مربع بوده و بموازات جهت پخش صدا قرار گرفته باشد. انرژی w محتوی درون این استوانه در مدت زمان $\frac{1}{c}$ تماما از آن خارج میشود. باین ترتیب، از واحد سطح در واحد زمان مقدار انرژی برابر $\frac{w}{\frac{1}{c}}$ یعنی wc خواهد‌گذشت. در واقع مثل اینکه خود انرژی با سرعت صوت حرکت میکند.

هنگام گفت و شنود بصدای بلند، شدت صدا نزدیک مصاحبین مساوی است با

$$۲ \times ۱۰^{-۷} \times ۳ \times ۱۰^{۴} = ۰٫۰۰۶ \frac{\text{ارگ}}{cm^{۲} \times sec}$$

(در اینجا ما از رقمی که در بالا بدست آمده است استفاده میکنیم).

بدیهیست که موج صوتی از منبع صدا به همه‌ی اطراف پخش میشود. بیائید در تصورمان گرد منبع صدا دو کره با شعاعهای مختلف بگذرانیم. البته انرژی صدا که از کره‌ی اولی میگذرد، از سطح کروی دوم هم خواهد گذشت. اگر شدت صدا را باحرف I نشان دهیم انرژی موجی که از کره میگذرد خواهد بود: $I = ۴\pi r^۲$ چون $۴\pi r^۲$ مساحت سطح کره بشعاع r است. اگر انرژی ضمن راه از کره‌ی اول به کره‌ی دوم تلف نشود،

$$I_۱ \times ۴\pi r_۱^۲ = I_۲ \times ۴\pi r_۲^۲$$

خواهدبود.

این بدانمعناست که شدتهای $I_۱$ و $I_۲$ موج در فاصله $r_۱$ و $r_۲$ از منبع صدا، به نسبت معکوس مجذور فواصل با هم متناسبند. از آنجا که شدت صدا با چگالی انرژی نسبت مستقیم دارد، پس شدت نیز مثل چگالی انرژی با مجذور دامنه‌ی نوسان متناسب است. از اینجا چنین بر میآید که دامنه‌های موج در فواصل $r_۱$ و $r_۲$ از منبع صدا، بنسبت عکس فواصل باهم متناسب میباشند. شدت صدا بنسبت عکس مجذور فاصله از منبع کم میشود و دامنه‌ی نوسان با توان یکم فاصله نسبت معکوس دارد. در واقع صدا کمی زود تر ضعیف میشود چون بخشی از انرژی ضمن راه از بین میرود. این بدانجهت است که در حین نوسان ذرات محیط بخشی از انرژی صرف از بین بردن اصطکاک گرانرو میشود. ولی این ضایعات نسبتا کوچکند وعلت اصلی اینکه صدا از فاصله‌ی دور بدتر شنیده میشود در قانون مجذورهای معکوس است.

بلند و یواش

اعضای حواس انسان از بسیاری جهات کاملتر از بهترین آلات و وسایل فنی میباشند. در مورد عضو شنوائی نیز چنین است. ما میتوانیم امواج با شدت از $۱۰^{-۹}$ ارگ/$\mathrm{cm}^۲ \times \mathrm{sec}$ تا $۱۰^۴$ همین واحدهای شدت را بصورت صدا احساس کنیم، یعنی قوی ترین صدا ده تریلیون بار از ضعیفترین صدا متفاوتست.

ببینیم یواشترین صدائی که انسان میتواند بشنود چیست؟ صدائی که بزحمت شنیده میشود در پرده‌ی طبله‌ی گوش فشاری برابر ۲×۱۰^{-۴} دین/cm^{2} بوجود میآورد که تقریبا ۲ ده میلیونیم گرم است. بهترین میکرو ترازو دارای چنین حساسیتی مثل گوش انسان نیست.

اگر انرژی صدا بیشتر از $۱۰^{۴}$ ارگ/$cm^{2}\times sec$ باشد، انسان صدا را نمیشنود، ولی احساس دردی میکند، چون در این حالت فشار روی پرده‌ی گوش به ۰٫۲ gf/cm^{2} میرسد و گوش فقط موج فشارها، یعنی ضربات متوالی و سریع تراکم‌ها و رقیق شدنها را با احساس درد میگیرد. اگر فشار دائمی هوا بهمین مقدار ۰٫۲ gf افزایش یابد، گوش «متوجه نمیشود». مثلا وقتی ما ازطبقه‌ی دوم عمارتی به کوچه میآئیم فشار معمولی هوا که برابر ۱ kgf/cm^{2} است، بیشتر از ۰٫۲ gf زیاد میشود.

انرژی موج صدای قوی بمیزان معتنابهی بیشتر از انرژی موجی است که حامل صدای خفیف مثلا پچ‌وپچ و خش‌وخش میباشد. باینجهت ارزشیابی بلندی صدا از روی مقدار انرژی عملا چندان مناسب نیست. تصور کنید کارمند متصدی تجسس وسایل مبارزه با سرو صدا و همهمه‌ی خیابان میخواهد در جلسه‌ی شورای شهر گزارشی بدهد در باره اینکه اگر خط تراموای با اتوبوس یا اتوبوس برقی عوض شود، اگر بوق زدن رانندگان در خیابان قدغن شود و نظایر اینها، چقدر از سرو صدای خیابان کاسته خواهد شد. برای اینکه مقایسه چشمگیر باشد معمولا به پلاکارد توسل میجویند و همانطور که معمول تهیه‌ی هرگونه نموداریست، روی پلاکارد ستونهائی میکشند که بلندی آنها نمایشگر درجه‌ی سرو صداست. ولی اگر بلندی صدا با مقدار انرژی تعیین شود، اشکال غیر قابل رفعی پیش میآید، چون اختلاف بین خاموشی و همهمه بقدری زیاد است که نمایش آن در یک نمودار با مقیاس واحد دشوارتر از اینست که مثلا ما بخواهیم فیل ومگسی را به اندازه‌های طبیعیشان روی یک پلاکارد تصویر کنیم.

در اینگونه موارد در فیزیک به مقیاس لگاریتمی متوسل میشوند.

اگر عددی با مضارب ۱۰ و ۱۰۰ و ۱۰۰۰ و الخ بار افزایش یابد، لگاریتم آن بمیزان ۱ و ۲ و ۳ و الخ اضافه میشود. بنابر این با استفاده از لگاریتم‌های مقادیر انرژی موج صوتی بجای خود انرژی،

میتوان صدای شدید موتور هواپیما و وزوز پشه‌ای را روی یک پلاکارد نمایش داد.

درجه بندی بلندی صدا باین طریق انجام میشود که نقطه‌ای را بطور شرطی بعنوان درجه‌ی صفر بلندی صدا برابر 10^{-9} ارگ/$cm^2 \times sec$ انتخاب میکنند. انسان حتی با دارا بودن عالیترین قوه‌ی شنوائی قادر به شنیدن صدا هائی با چنین نیرو نیست. بعد تعیین میکنند که انرژی صدای منظور ما E چند بار بیشتر از این درجه‌ی ابتدائی E_0 است، بعبارت دیگر نسبت E/E_0 را پیدا میکنند.

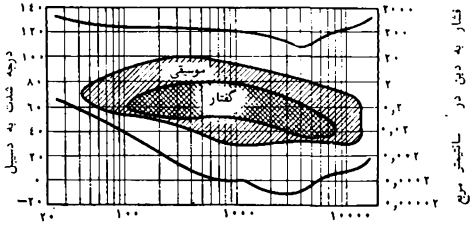
لگاریتم بپایه‌ی ۱۰ این نسبت بعنوان مقیاس بلندی صدا پذیرفته شده است. واحد بلندی صدا بل نام دارد. ولی معمولا از اجزاء اعشاری آن که دسیبل (*db*) نامیده میشود استفاده میکنند. بلندی صدا به دسیبل برابر است با $10 \lg \frac{E}{E_0}$

اندازه‌ی دسیبل را میتوان از روی جدول زیر قضاوت نمود. در جدول مقادیر بلندی صداهای مختلف در فاصله چند متری از منبع صدا به دسیبل نشان داده شده است:

خش و خش برگها	۱۰	دسیبل
خیابان ساکت‌وآرام	۳۵	»
اتوبیل در حرکت	۵۰	»
گفت وگو بصدای‌بلند	۷۰	»
خیابان شلوغ وپرهیاهو . . .	۹۰	»
هواپیما	۱۰۰	»

جدول لگاریتمی بالا تصوری از دسیبل را بما میدهد. مثلا افزایش نیروی صدا باندازه‌ی یک دسیبل مطابق است با ۱,۲۶ = $10^{0,1}$ بار یعنی ۲۶ در صد اعتلای شدت صدا. دو بار افزایش شدت صدا با تغییر بلندی صدا با ندازه‌ی ۳ دسیبل مطابق است، پنج بار افزایش شدت با ۷ دسیبل و ده بار با ۱۰ دسیبل مطابقت دارد.

اگر فاصله از منبع صدا دو برابر شود، شدت صدا چهار بار و نیروی صدا باندازه‌ی ٦ دسیبل کاهش مییابد. فرض کنیم که ما در فاصله‌ی یکمتری سیم آلت موسیقی در حال نوازش قرار داشتیم و



بسامد نوسانها به sec^{-1}

شکل ۱۲۱

بعد به فاصله‌ی ۱۰ متری آن رفتیم. در این حالت شدت موجی که به ما میرسد ۱۰۰ بار و نیروی صدا با ندازه‌ی ۲۰ دسیبل کاهش خواهد یافت.

ما قبلا از محدود بودن حدود بسامد های قابل شنیدن صحبت کردیم. حالا که اطلاعاتمان با آگاهی از درجه حساسیت گوش نسبت به صداهای خفیف و بلند تکمیل گشته است میتوان نمودار قابلیت شنوائی را برای انسان عادی ترسیم کرد، (شکل ۱۲۱). روی محور افقی نمودار بسامد صدا و روی محور قائم انرژی صدا برده شده‌اند. در تصویر مرز قابلیت شنوائی و مرز احساس درد نشان داده شده است. منطقه‌ی شنوائی درون منطقه‌ی قابلیت شنوائی قرار دارد.

صداهای ناشنیدنی

بسامد صدای ۲۰۰۰۰ هرتز حدیست که در بالای آن، گوش انسان نوسانهای مکانیکی محیط را نمیشنود. بطرق مختلف میتوان — نوسانهای با بسامد خیلی بالاتر ایجاد کرد که آنهارا انسان نخواهد شنید، ولی دستگاهها میتوانند ثبت کنند. ضمنا تنها دستگاهها نیستند که این نوسانها را ثبت میکنند. بسیاری از حیوانات از جمله

خفاش، زنبورعسل، نهنگ و دلفین یا خوک دریائی قادرند نوسانهای مکانیکی با بسامد تا ۱۰۰۰۰۰ هرتز را بشنوند.

اکنون میتوان نوسانهای با بسامد تا یک میلیارد هرتز را گرفت. این نوسانات هرچند قابل شنیدن نیستند، ولی برای آنکه خویشاوندی آنهابا صدا نشان داده شود، ماوراء صوت نا میده میشوند.

نوسانهای ماوراء صوت با بسامدهای خیلی زیاد را بوسیله‌ی صفحات کوارتزی بدست میآورند. این صفحات را از مونوکریستالهای کوارتز میبرند. آنها دارای این خاصیت جالبند که اگر به آنها نیروی برق داده شود انقباض یا انبساط مییابند. ولی اگر به صفحه‌ی کوارتزی نیروی برق متغیر داده شود، صفحه متوالیا منقبض و منبسط میشود، یعنی شروع به نوسان میکند.

باین ترتیب میتوان جریانهای نیرومند ماوراء صوت با شدت چند هزار ژول در ۱ سانتیمتر مربع در ثانیه بوجود آورد. جالبست اگر این رقم را با شدت صدای قابل شنیدن مقایسه کنیم شدت صدای تیراندازی توپ از نقطه بلا فاصله نزدیک آن از ۰٫۰۰۵ ژول در ۱ سانتیمتر مربع در ثانیه تجاوز نمیکند.

انرژی ماوراء صوت بقدری عظیم است که آنرا میشود احساس کرد. اگر شما دستتانرا در مایعی فرو برید که نوسانهای ماوراء صوت انجام میدهد، احساس درد شدید خواهید کرد.

ماوراء صوت قادر است تبدیلهای جالبی از ماده بوجود آورد و بهمین جهت در بسیاری رشته‌های گوناگون موارد استعمال گسترده‌ای دارد. یکی از این تبدیلها خرد کردن ماده است. اگر قطعه‌ی کوچکی از سرب یا مس را در مایعی بگذاریم و آنرا در معرض تاثیر ماوراء صوت قرار دهیم، فلز خرد میشود و تعلیق (یا با صطلاح سوسپنسیون) بسیار ظریفی را تشکیل میدهد. خرد شدن در مواردی صورت میگیرد که ابعاد اجزاء بزرگتر از طول موج باشد.

اگر اجزاء ماده کوچک باشند، تاثیر ماوراء صوت معکوس است. اگر در اطاق پر از دود با ماوراء صوت عمل کنیم، بزودی اطاق بکلی از دود تمیز خواهد شد. چون ذرات دود زیر تاثیر ماوراء صوت بهم میچسپند (این پدیده‌را انعقاد یا بهم بستگی نامند) و دهها و صدها بار سنگینتر شده به کف اطاق فرود میآیند.

تاثیر ماوراء صوت روی عناصر بیولوژیکی بویژه جالبست. بسیاری از یاخته‌ها بویژه یاخته‌های نخی شکل زیر تا ثیر ماوراء صوت از بین میروند. باکتریها نیز از بین میروند و یا درمعرض تغییرات جدی قرار میگیرند. با ماوراء صوت میتوان شیر را استریلیزه کرد.

یک مورد استعمال جالب ماوراء صوت در یافتن ترکها و دیگر نقایص در اشیاء ریخته‌ی فلزی باضخامت زیاد (تا ده متر) است. اگر ترک خوردگی یا جای خالی در راه شعاع ماوراء صوت قرار گیرد، اشعه از آن نمیگذرند — و در جهت معکوس منعکس میشوند. اشعه‌ی انعکاس یافته را بوسیله‌ی دستگاهی میگیرند و از روی زمان رفت و بازگشت اشعه معین میکنند که نقیصه‌ی درون فلز در چه عمقی قرار دارد.

خفاشها بطرز جالبی از ماوراء صوت استفاده میکنند. برای اینکه خفاش بتواند در تاریکی مطلق وجود داشته باشد، طبیعت آنرا از دستگاه جانمای صوتی فوق العاده مکمل بهره مند ساخته است. این دستگاه با بسامدهای ماوراء صوتی کار میکند. خفاش در حال پرواز علامات با بسامد ۲۵۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰ سیکل در ثانیه را که برای گوش انسان قابل شنیدن نیست میفرستد. هر علامت تقریبا ۱۰ تا ۱۵ هزارم ثانیه طول میکشد. علامت ماوراء صوتی که خفاش در استداد معینی نسبت به بدنش میفرستد، به مانع بر میخورد و منعکس میشود و باز میگردد. اعضاء شنوائی خفاش هم بطور غیرعادی تکامل یافته است. خفاش قادر است علامت انعکاس یافته را حتی اگر از علامت ارسالی اولیه دو هزار بار ضعیفتر هم باشد، بشنود. علاوه براین، خفاش میتواند علامت انعکاس یافته‌ی خود را درمیان هیاهوی اطراف، ولو این هیاهو هزاربار از انعکاس علامت ارسالی او قویتر هم باشد، تشخیص بدهد. حیوان از روی مدت زمان رفت و بازگشت علامت ارسالی معین میکند (البته بطور غریزی) که مانع در چه فاصله‌ای قرار دارد.

چگونه صدا منحرف میشود

شما توی اطاقی در طبقه‌ی دوم عمارتی نشسته اید و صحبت میکنید. پنجره‌ی اطاق باز است و پشت پنجره توی حیاط کسی ایستاده است.

آیا او صدای شمارا میشنود؟ آری، اگر شما نسبتا بلند صحبت کنید، او خواهد شنید. ولی بهر حال خیلی بدتر از آن حالتی میشنود که از نردبانی بالا رود و درست مقابل پنجره قرار گیرد. امواج صدا که از پنجره خارج میشوند، گوئی بهر طرف پخش میگردند، ولی نه بطور یکسان. چون امواج صدا بهتر از همه بجلو بخط مستقیم انتشار میبایند. و ضمنا تا اندازه‌ای هم به اطراف منحرف میشوند. آیا در مورد همه‌ی امواج صوتی همینطور است؟ از قرار معلوم اینطور نیست.

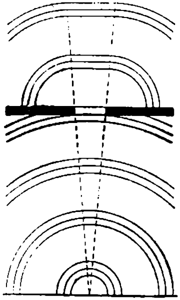
در اینجا نسبت بین طول موج و اندازه‌ی شکافی که موج از آن خارج میشود نقش اصلی بازی میکند. اگر نسبت طول موج به اندازه‌ی شکاف زیاد باشد، امواج ضمن خروج از شکاف بهر سو پراکنده میشوند بقسمی که گوئی خود آن شکاف منبع صدا است. برعکس، اگر طول موج خیلی کوچکتر از ابعاد شکاف باشد، صدا بصورت اشعه انتشار مییابد و در جائی که خط مستقیم واصل از منبع صدا به شخص ناظر به مانع (در مثال ما به دیوار) بر خورد کند، در آن سوی مانع «سایه» ای ایجاد میگردد و صدا تقریبا شنیده نمیشود.

در مثال ما بسامد متوسط صدای انسان ۱۰۰۰ هرتز، با طول موج ۳۰ سانتیمتر مطابق است. باینجهت اینگونه امواج از شکاف پنجره‌ی یک متری بیشتر بجلو پخش میگردند، ولی به اطراف هم بطور محسوسی منحرف میشوند.

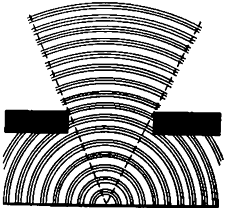
تجسم انحراف امواج صوتی پس از عبور از موانع بصورت تصویر دشوار است.

خیلی سهلتر و ساده‌تر است اگر نشان دهیم که در وضع مشابه، امواج سطحی آب چگونه انتشار مییابند. در باره‌ی این امواج ما کمی بعد صحبت خواهیم کرد. آنها تا اندازه‌ای خواص ویژه دارند. ولی قواعد انحراف امواج در برخورد به موانع چه برای امواج آب و چه در مورد امواج هوائی صدا یکسانند.

اشکال ۱۲۲ و ۱۲۳ عبور امواج آب با طولهای مختلف را از شکافی نشان میدهد. در شکل ۱۲۲ طول موج خیلی بیشتر از اندازه‌ی شکاف است. در این حالت موج منطقه‌ی پشت مانع را تقریبا بطور کامل در بر میگیرد. در شکل ۱۲۳ طول موج خیلی کم است. در این حالت



شکل ۱۲۲



شکل ۱۲۳

پخش موج بصورت اشعه صورت میگیرد. در منطقه‌ی سایه‌ی هندسی پشت مانع موج تقریبا نیست.

باین ترتیب معلوم میشود که وقتی طول امواج صدا خیلی کمتر از اندازه‌های اشیائی است که سر راه امواج قرار میگیرند، صدا چنان پخش میشود که گوئی نوسان هوا نیست، بلکه جریان ذرات متحرک در هواست. فرق آن با ذرات عادی بطور عمده در اینست که ذرات عادی میتوانند با سرعتهای دلخواه حرکت کنند، ولی صدا همیشه با سرعت وا حدی پخش میشود.

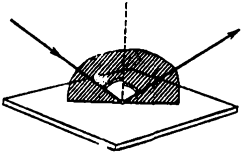
طبیعت موجی صدا از اینجا معلوم میشود که صدا همواره بدرجه‌ی معینی از صورت انتشار مستقیم‌الخط منحرف میشود. بطوریکه گفته شد هرچه طول موج کمتر باشد، این انحراف کمتر است، ولی انحراف همیشه وجود دارد واصولا ممکنست آنرا اندازه گرفت. این انحراف را پراش (دیفراکسیون) صدا نامند. اگر ما موجی بودن صدا را مستقیما (از طریق در یافت صدا) نمیدانستیم همین وجود پراش خود دلیل مقنعی بود براینکه صدا حرکت موجی است. با مطالعه‌ی پراش میتوان طول امواج صدا را اندازه گرفت، البته بازهم اگر ما طول موج را از روی بسامد نوسانهای منبع صدا ندانسته باشیم.

در این مبحث ما فرض خواهیم کرد که طول موج صدا خیلی کم است و بنابر این صدا بصورت اشعه پخش میشود. حالا ببینیم وقتی این شعاع صوتی از هوا بر سطح سختی میتابد چه میشود. واضحست که در این حالت صدا انعکاس مییابد. ولی بکجا و چطور؟

قیاس پخش صدا باحرکت ذرات مادی نشان میدهد که این انعکاس باید همانطور که توپی به دیوار میخورد و باز میگردد صورت گیرد با این تفاوت که سرعت توپ در برخورد بدیوار بعلت وجود جریانهای سایش کم میشود، در صورتیکه سرعت پخش صدا که فقط با خواص محیط هوا بستگی دارد، تغییر نمیکند. در برخورد موج صوتی به دیوار، تاثیر سایش نه بصورت تغییر سرعت صدا، بلکه باین صورت تظاهر میکند که بخشی از انرژی امواج صوتی به گرما مبدل میشود.

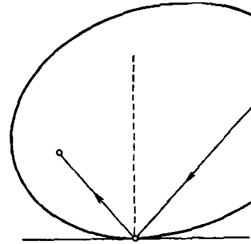
از آنجا که انعکاس صدا با ضربت کشسانی تفاوتی در اصول ندارد، قانون انعکاس صدا را میتوان باین صورت فرموله کرد: زاویه‌ی تابش شعاع صوتی، یعنی زاویه‌ی حاصل بین شعاع و خط قائم (یعنی عمود) بر قطعه‌ای از سطح که شعاع بر آن میتابد، برابر است با زاویه‌ی انعکاس. ضمنا شعاع منعکس در سطحی قرار دارد که از شعاع تابش و خط قائم بر سطح میگذرد. این سطح را سطح تابش شعاع نامند.

بنابراین اگر ما بخواهیم بدانیم که شعاع چگونه انعکاس مییابد باید از نقطه‌ی تابش شعاع خطی بر سطح تابش عمود کنیم، زاویه‌ی تابش را اندازه بگیریم وسطح تابش‌را بسازیم. بعد در همین سطح، در سوی دیگر خط عمود بر سطح تابش، زاویه‌ای برابر زاویه‌ی تابش‌بسازیم. خط مستقیم حاصل شعاع منعکس خواهد بود. (شکل ۱۲٤).


شکل ۱۲٤

حالا به حل مساله‌ی جالبی میپردازیم.

بطوریکه میدانیم، صدا از منبع به همه‌ی اطراف و جوانب پخش



شکل ۱۲۵

میشود و به نقطه‌ی دور از منبع فقط قسمت کوچکی از انرژی صوتی میرسد. سطح انعکاس دهنده چگونه باید باشد که بتواند صدای منبع را دوباره در یک نقطه جمع کند؟ شکل سطح منعکس کننده باید طوری باشد که اشعه ای که از یک نقطه (منبع صدا) تحت زوایای مختلف بر آن میتابند، مجددا بسوی یک نقطه منعکس شوند. این چه سطحی میتواند باشد؟

ما اکنون میدانیم که سطح بیضی چیست. در صفحه ۱۸۶ در توصیف این منحنی جالب گفته شد که مجموع فواصل هر نقطه واقع بر محیط بیضی از دو کانون آن برای تمام نقاط بیضی یکی است. تصور کنید که بیضی در حول قطر درازش دوران کند.

شکل حاصل از دوران را بیضوی (الیپسوئید) نامند که شبیه تخم مرغ است.

بیضی دارای این خاصیت هندسی است (شکل ۱۲۵) که اگر هر نقطه واقع بر محیط بیضی را به دو کانون آن وصل کنیم زاویه‌ای بدست میآید که خط منصف آن عمود بر بیضی است (یعنی عمود بر خط مماس بر بیضی در آن نقطه است). بنابر این اگر از یکی از دو کانون بیضوی شعاع صوتی خارج شود، این شعاع بعد از انعکاس در سطح آن به کانون دیگر خواهد رفت. این خاصیت مربوط به کلیه‌ی شعاعها است و بنابر این تمام جریان صوتی که از یک کانون خارج میشود، در کانون دیگر جمع و متمرکز میگردد.

این خاصیت سطوح منحنی بیضوی را در ازمنه‌ی قدیم نیز میدانستند.

در قرون وسطی، در دوران انکیزیسیون که نظارت بر افکار مردمان یکی از جنبه های مهم فعالیت دولتی را تشکیل میداد، از سطوح قوسی برای استراق سمع استفاده میکردند. و در نتیجه ، مثلاً دو نفر در گوشه‌ی میخانه ای آهسته با هم گفت و گو و تبادل افکار میکردند، غافل از اینکه کشیشی که در گوشه‌ی دیگر میخانه چرت میزند، هر کلمه‌ی آنها را درست مثل خود شان میشنود.

ساختن سطوح بیضوی دشوار است. ولی قطعات کوچک سطح کروی از لحاظ شکل تفاوت کمی با قطعات بیضوی دارند.

اگر شیئی صدا دهنده جلو چنین «آینه» ی کروی قرار داده شود، اشعه‌ی صوتی که از آن خارج میگردند درمیدان دیگر انعکاس مجددا جمع میشوند، البته نه در یک نقطه، چنانکه در حالت بیضوی واقعی بود. بلکه در منطقه‌ی کوچکی از فضا.

میتوان حتی با یک بشقاب معمولی توگود چنین آزمایشی را انجام داد: ساعتی را نزدیک این بشقاب بگذارید و امتحان کنید که مثلاً در فاصله‌ی تقریبا یک‌متری تیک تیک ساعت را عملاً نمیشنوید. ولی میتوانید نقطه ای را بیابید که در آن صدای تیک تیک ساعت را بهمان بلندی که اگر آنرا نزدیک گوشتان میگذاشتید بشنوید. از این پدیده در ساختمان جایگاه سوفلور در تئاتر استفاده میشود. شکل جایگاه و طرز استقرار سوفلور طوریست که صدا را بطرف صحنه‌ی نمایش منعکس میکند.

انعکاس صدا از دیوارهای تالارها مساله ایست که بویژه برای سازندگان تئاترها و تالارهای کنسرت و اجتماعات جالبست. این رشته‌ی فن ساختمان که با مساله‌ی شنوائی هر چه بهتر در تالارهای مسدود سروکار دارد، آکوستیک معماری نامیده میشود.

امواج سطحی

زیر دریائیها از طوفانهای دریا مصونند. در شدیدترین طوفانها در عمق چند متری زیر سطح دریا آرامش حکمفرماست. امواج دریا یکی از نمونه های حرکت موجی است که فقط سطح جسم را در بر میگیرد.

گاه ممکنست چنین بنظر برسد که امواج دریا جریانهای آب در حرکتند. ولی اینطور نیست. اگر به حرکت آزاد قایقی که سرنشینان آن پارو نمیزنند، بر روی امواج دریا دقت کنیم ، حرکت نوسانی اجزاء آب بآسانی مشاهده میشود. قایق روی امواج ببالا و پائین، کمی بجلو و بعقب حرکت میکند، و تقریبا از جایش حرکت نمیکند. هریک از اجزاء آب خط سیری نزدیک به دایره ترسیم میکند. سطح دوایر در جهت پخش امواج، یعنی در عرض جبههٔی موج قرار دارد.

منظرهٔی تلاطم دریا خیلی مختلف است : امواج کوچک، امواج عظیم، امواجی که پشت سرهم بسرعت یا بندرت بلند میشوند. اگر بخواهیم بزبان فیزیک صحبت کنیم، باید بگوئیم که امواج با دامنه های مختلف و با طولهای مختلف میبا شند.

بطوریکه گفته شد تلاطم دریا با افزایش ژرفا خیلی زود از بین میرود. اجزاء آب واقع در زیر سطح دریا هر چه بعمق آب پا ئینتر رویم با میدان کوچکتری نوسان میکنند. در ژرفای برابر نصف طول موج دامنهٔی نوسان ۲۰ بار کم میشود و در ژرفای یک طول موج تقریبا هیچ حرکتی باقی نمیماند.

تا کنون ما از امواجی صحبت کردیم که سرعت‌پخش آنها فقط به خواص محیط بستگی داشت. امواج سطحی بگونهٔی دیگرند : در اینجا نوسانهای با بسامد مختلف با سرعتهای متفاوتی پخش میشوند. سرعت‌پخش و دورهٔی نوسان با این فرمول ساده بهم مربوطند: $c=\frac{gT}{2\pi}$ که در آن g شتاب نیروی ثقل است. وجود شتاب نیروی ثقل g در این فرمول کاملاً طبیعی است، چون مستوی بودن سطح آب همانا نتیجهٔی تاثیر نیروی ثقل است. بموجب این فرمول در صورتیکه بسامد نوسان ۱ هرتز باشد، امواج با سرعتی حدود ۱,۵ m/sec حرکت میکنند. این فرمول برای امواج دریای باز صادق است. در نزدیکی ساحل و بطور کلی در ژرفاهای کم این رابطه ساده بغرنج میگردد.

چون $\lambda=cT$ است، پس $c=\sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$. یعنی هنگام تلاطم شدید در بخشی از دریا، ابتدا بلندترین امواج که بیشترین سرعت پخش را دارا میباشند به نقاط دور دست میرسند.

بین انتقال صدا توسط مایعات و گازها از یکسو و جامدات از سوی دیگر تفاوتی موجود است که چندان کم اهمیت نیست. این تفاوت عبارت از آنست که در اجسام جامد علاوه بر امواج طولی ممکنست امواج عرضی نیز بوجود آید.

اصطلاح موج عرضی بخودی خود گویاست. موج عرضی دارای این خاصیت است که اجزاء شرکت کننده در جریان موجی نوسانهائی نه در جهت پخش موج، بلکه در جهت عرضی، یعنی عمود بر جهت‌پخش انجام میدهند.

موج صوتی در گازها و مایعات موج انقباضها و انبساطهای متوالی است که یکدیگر را عوض میکنند. چنین موجی فقط میتواند طولی باشد، چون نوسانهای عرضی اجزاء نمیتوانند انگیزه‌ی تغییرات محلی حجم باشند، یعنی نمیتوانند سبب انقباض و انبساط گردند. موج عرضی در مایع و گاز ممکن نیست، زیرا این محیطها در مقابل انقباض و انبساط مقاومت میورزند، ولی درمقابل پیشرفت و تغییر مکان مقاوست نمیکنند. جسم جامد نه فقط در مقابل تغییر حجم خود، بلکه در برابر تغییر شکل نیز مقاوست نشان میدهد و بهمین جهت در جامدات بموازات امواج طولی امواج عرضی نیز میتوانند بوجود آیند.

درحین انتشار موج عرضی، در محیط جامد موج تغییر مکان بوجود میآید — اجزاء جسم بصورت موج متناوباً بجهات مختلف خط انتشار پیش میروند. در صور تیکه امواج طولی درمحیط جامد، مثل امواج درمایعات و گازها، با انقباضها و انبساطها همراه میبا شند.

امواج عرضی و طولی صدا را بطرز یکسانی خوب منتقل میکنند، ولی سرعت انتقال آنها یکسان نیست. امواج طولی همیشه سریعتر از امواج عرضی پخش میشوند.

بذکر چند رقم میپردازیم. در فولاد سرعت امواج عرضی قریب m/sec ۳۰۰۰ و امواج طولی — m/sec ۶۰۰۰ است. صدا در سرب نرم کمترین سرعت‌پخش را دارد — m/sec ۷۰۰ برای امواج عرضی و m/sec ۲۲۰۰ برای امواج طولی.

نسبت بین سرعت امواج طولی و عرضی در لاستیک بویژه رقم بزرگی است.

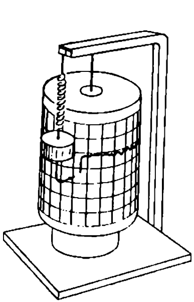
لاستیک در مقابل تغییر شکل مقاومت ضعیفی ابراز میدارد، ولی حجم خودرا خیلی بسختی تغییر میدهد. امواج عرضی در لاستیک با سرعت ۳۰ m/sec پخش میشوند که ده بار کمتر از سرعت صوت در هواست.

غیر از این دو نوع موج امواج سطحی نیز در جسم جامد پخش میشوند. ولی آنها به امواج دریا بهیچوجه شبیه نیستند. در امواج دریا نیروی بازگشت دهندهی اجزاء انحراف یافته نیروی ثقل است. امواج در سطح جسم جامد بوسیلهی نیروهای کشسانی که اجزاء جسم جامد را بهم مربوط میسازند نگهداشته میشوند. بنابراین طبیعتا سرعت امواج سطحی با خواص کشسانی مربوط میباشد. سرعت امواج سطحی تقریبا ۰٫۹ سرعت پخش امواج عرضی است. مسیرهای اجزاء در حال نوسان، مثل مورد مایع، در سطح عرضی نسبت به جبهه موج قرار دارند، نقاط روی منحنی مسدودی شبیه بیضی حرکت میکنند. با دور شدن تدریجی از سطح شکل بیضی تغییر میيابد، میدان نوسان کمتر میشود و موج فرو مینشیند.

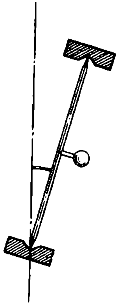
طلایه‌های زلزله

زمین صدا را خوب منتقل میکند. تقریبا در هر رمانی از سر — گذشتهای قرون وسطائی شما به صحنهی تعقیب قهرمان داستان که سوار بر اسب بسرعت میتازد بر خورد میکنید. «سوار اسبش را متوقف ساخت، بسرعت از اسب پائین پرید، گوشش را بر زمین نهاد و گفت: «مارا تعقیب میکنند، باید عجله کرد!» واقعا هم صدای بر خورد سم اسب بزمین را میتوان از فاصلهی بیش از یک کیلومتر شنید. زمین همانند هر جسم کشسانی نقش رسانای امواج صدارا بازی میکند.

امواج صدا که از راه زمین پخش میشوند، اطلاعاتی از زلزله‌ها برای ما میآورند و مارا از جریا نهائی که در اعماق زمین میگذرد آشنا میسازند. امواج صوتی که بهنگام زلزله بوجود میآیند، امواج زلزله‌ای (سیسمیک) نامیده میشوند. وجود موج زلزله ای، دامنهی آن، سرعت، طول، بسامد نوسان — همهی این عوامل را میتوان بوسیلهی دستگاههای ویژهی بسیار حساس که زلزله‌نگار (سیسموگراف) نام دارد معین کرد.



شکل ۱۲۶



شکل ۱۲۷

سیسموگرافها دستگاههای مرکبی هستند. ولی فهم اصل عمل آنها آسانست. قسمت اصلی سیسموگراف وزنه‌ی سنگینی است که به فنری آویزان است. بهنگام تغییر مکان قائم زمین نقطه‌ی آویزش فنر بقسمی که در شکل ۱۲۶ نشان داده شده است تغییر مکان میدهد. وزنه‌ی آویخته به فنر در نتیجه‌ی اینرسی زیادی که دارد، ابتداً سرجایش میماند. نوک مدادی به وزنه نصب شده است که روی کاغذ پیچیده بدور استوانه‌ی پایه خط قائمی رسم میکند. برای تر سیم موج زلزله‌ای باید استوانه را چرخاند.

زلزله نگار مشروحه بالا تغییر مکانهای قائم را ثبت میکند. زلزله نگارهائی هم هستند که تغییر مکانهای افقی را ثبت مینما یند. اصل کار زلزله نگار افقی در شکل ۱۲۷ نشان داده شده است . قسمت مهم و اساسی دستگاه را میله‌ی تقریبا قائم تشکیل میدهد. این میله توسط یک وزنه ٍ اکسانتریک به آونگی مبدل میشود که میتواند حول محور میله نوسان کند. اگر زمین بی حرکت و آرام باشد، وزنه‌ی آونگ در پائینترین وضع میایستد. هرتکانی در جهت افقی، محور آونگ را بحرکت در میاورد، در حالی که وزنه‌ی سنگین در اثر اینرسی ابتدا سرجای خود میماند. حرکت آونگ توسط مداد خودکاری ثبت میگردد.

اگر یک زلزله نگار قائم و دو زلزله نگار افقی را که در سطوح متقابلاً عمود برهم نوسان میکنند در نقطه‌ای مستقر کنیم، مقدار و جهت هرگونه لرزه و جابجا شدنی را میتوان ثبت نمود. معمولاً با شنیدن کلمه‌ی «زلزله» در اشخاص تصور خرابی و ویرانی خانه‌ها، فروریختن درختها، بازشدن شکافها در زمین و تلف شدن مردمان بوجود میآید. اینگونه زلزله های بزرگ و ویرانگر بندرت رخ میدهند. ولی پژوهشگران زلزله شناس اصطلاح «زلزله» را به کلیه‌ی رخداد های زیر زمینی که قادر است نوک مداد زلزله نگار، ثبات نوسانهای پوسته‌ی زمین‌را بحرکت در آورد، اطلاق میکنند. این زلزله‌هارا غیر از زلزله نگار هیچکس حتی احساس نمیکند. از این زلزله‌ها در کره‌ی زمین هر سال حدود صد هزار روی میدهد. معلوم میشود که در «قلمرو زیر زمینی » زندگی کاملاً فعالی حکمرواست!

موج زلزله از کانون زلزله به همه‌ی جهات پخش میشود و بوسیله‌ی بسیاری دستگاههای زلزله نگار مستقر در شهرها و کشورهای مختلف ثبت میگردد. از هر لرزه‌ی زیرزمینی سه بار اطلاع خواهد رسید. چون سه نوع موج که در بالا به آن اشاره شد، از مبدأ زلزله راهی سفر میشوند. اولین بار موج طولی و بعد، موج عرضی به ناظر میرسد، و سر انجام موج سطحی خواهد رسید.

ضمنا امواج سطحی برای زلزله شناس از همه مهمتراند. چون (بعلت سهولت فهم) آنها از همه شدیدتراند.

درصفحه‌ی ۲۷۵ گفتیم که شدت موج صدا به نسبت مجذور فاصله از منبع صدا ضعیف میشود. ولی این به امواج سطحی مربوط نیست. بیائیم در حول منبع صدا بجای دو کره دو دایره بسازیم. انرژی موجی که از دایره میگذرد با $I \times 2\pi r$ متناسب میباشد که در آن I شدت موج است. بنابراین، در صورت فقدان ضایعات انرژی، شدت موج سطحی بصورت $\frac{1}{r}$ کاهش مییابد، نه $\frac{1}{r^2}$. از اینرو وقتی این امواج به ناظر میرسند، خیلی کمتر از امواج طولی و عرضی مکانی ضعیف شده‌اند.

پژوهش امواج زلزله‌ای نه فقط برای تعیین مرکز زلزله مفید است، بلکه به تعیین ساختار کره‌ی‌زمین نیز کمک میکند. علاماتی که از

اعماق کره‌ی‌زمین میرسند بما امکان میدهند که درباره‌ی ترکیب ساختاری کره‌ی‌زمین قضاوت کنیم. چون سرعت امواج زلزله‌ای در ژرفاهای مختلف متفاوتست. در نزدیکی سطح زمین امواج طولی سرعتی ردیف km/sec ۵,۵ دارند و امواج عرضی — km/sec ۳,۳. ضمنا در مرکز زمین سرعت پخش امواج زلزله‌ای به ۱۱ تا ۱۲ کیلومتر در ثانیه میرسد.

پژوهشگران با دانستن اینکه چه ویژگیهای ساختار زمین میتوانند در سرعت پخش امواج مؤثر باشند، در باره‌ی ترکیب و ساختار هسته‌ی زمین نتیجه‌گیری میکنند. مثلاً معلوم شده است که امواج‌عرضی به عمق هسته‌ی زمین نفوذ نمی کنند و از اینجا چنین نتیجه میگیرند که هسته‌ی‌زمین مایع است چون امواج عرضی از مایعات عبور نمی‌کنند.

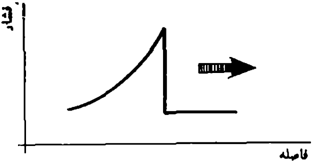
موج ضربتی

در تجربه‌ی زندگی از واژه‌ی «موج» تصور یک جریان دوره‌ای، متناوب در انسان بوجود میآید که نمونه‌ی خیلی واضح و چشمگیر آن تلاطم دریاست. تاب خوردن روی «امواج» سرگرمی مفرح شناگران است.

در فیزیک واژه‌ی «موج» بمفهوم خیلی گسترده‌تری بکار برده میشود و مثلاً حتی در موردی که افزایش یا کاهش فشار در نقطه ای با ضربتی آنی، با انفجار یا مکش هوا بوجود آمده باشد نیز از انتشار موج سخن میگویند.

موج هوا که در نتیجه‌ی انفجار بوجود میآید بصورت کاملاً ویژه‌ای بنظر میرسد. (قبلاً گفته بودیم که از موج هوا میتوان عکسبرداری کرد، بنابراین کلمه‌ی «بنظر میرسد» را میتوان در مورد موج فشار بکاربرد.)

در شکل ۱۲۸ نیمرخ آنی یک چنین موج انفجاری تصویر شده است. منحنی، تقسیم فشار را در طول یکی از جهات انتشار موج نشان میدهد. تصویر نیمرخ موج شامل یک اوجگیری تدریجی است که با افت شدید پایان مییابد. جهت حرکت موج در تصویر از چپ براست



شکل ۱۲۸

نشان داده شده است. قسمتهائی از هوا که در طرف راست جبهه قرار دارند، در لحظه‌ی مفروض آرامند — موج به آنها خواهد رسید.

ویژگی اصلی موج انفجاری مورد بحث ما که آنرا موج ضربتی نیز مینامند درجهش شدید و آنی فشار در «جبهه» است. نقاطی که در حالت آرام قرار دارند، بطور آنی در معرض فشار ماکزیموم قرار میگیرند بطوریکه قسمتی از هوا که در این لحظه در فشار یک آتمسفر قرار داشت، لحظه‌ای بعد یکدفعه فشار در این قسمت به ماکزیموم میرسد. بعد، با پیشروی آتی موج ضربتی، فشار در نقطه‌ی مورد توجه ما بر طبق نیم‌رخ شیب ملایم سمت چپ تپه بتدریج کم میشود.

در شکل ۱۲۸ تقسیم فشار در طول خطی از خطوط انتشار موج نشان داده شده‌است. موج در فضا انتشار مییابد، وجبهه عبارت از سطح است.

جبهه‌ی موج ضربتی نه فقط جهش فشار، بلکه هم‌چنین جهش‌چگالی و حرارت را نیز در بر دارد.

موج ضربتی علاوه بر تغییر فشار و حرارت، حرکت را نیز همراه میآورد. و در موج صدا هوا در طول خط انتشار موج بحرکت در میآید، ولی در آنجا این پدیده کم بچشم میخورد. درموج ضر بتی هوا چنان بشدت دفع میشود که واژه‌ی «دفع» برای آن خیلی ملایم بنظر میر سد. موج ضربتی شدید ترین، پرتوان‌ترین‌باد — تند باد بوجود میآورد... برای حرکت در امواج پرتوان ضربتی ممکنست بطور کلی واژه‌ی مناسبی گیر نیاید.

جهش خواصی که ما درباره‌ی آنها صحبت میکنیم، فوق العاده شدید و آنی است — گذار از آرامش کامل به سرعت ماکزیموم

حرکت در قطعه‌ی راهی برابر با چند طول حرکت آزاد ملکول گاز صورت میگیرد. این مقدار زیر میکروسکپی برای هوا حدود یک صدهزارم سانتیمتر است. زمان جهش با اجزاء ده میلیاردم ثانیه (10^{-10}) اندازه گیری میشود. یک‌چنین تغییر واقعا آنی در حالت فشار، چگالی، حرارت و سرعت‌حرکت، همانا نشانه‌ی موج ضربتی است.

وابسته به نیروی انفجار، جهش فشار که موج ضربتی یا بعبارت دیگر بلندی جبهه را همراه خود میآورد، ممکنست کاملاً گوناگون باشد: درلحظه‌ی ورود موج‌ضربتی، فشار میتواند از چند درصد تا دهها بار افزایش یابد.

مقادیر جهشهای کلیه کمیتها در جبهه‌ی موج‌ضربتی با همدیگر مربوطند. با دانستن مقدار جهش فشار میتوان مقادیر جهشهای چگالی، حرارت و سرعت‌حرکت را محاسبه کرد. بلندی جبهه هم‌چنین سرعت انتشار موج‌ضربتی را نیز معین میکند. سرعت امواج ضربتی ضعیف با سرعت انتشار موج‌صوتی معمولی تفاوتی ندارد. با افزایش بلندی جبهه، سرعت انتشار موج ضربتی نیز افزایش مییابد.

حالا از تاثیرات یک موج ضربتی «ساده» که فشار هوا را فقط یکباره‌نیم افزایش میدهد ارقامی چند میآوریم. از قرار معلوم یک‌چنین افزایش فشار باعث میشود که چگالی هوا بمیزان ۳۰ درصد و حرارت ۲۵° افزایش یابد. سرعت جبهه‌ی چنین موج ضربتی ۴۰۰ m/sec است. باچنین جهش نسبتا کوچک فشار (بمیزان ۱٫۵ برابر)، موج‌ضربتی هوا را باسرعت قریب ۱۰۰ m/sec یعنی ۳۶۰ کیلومتر در ساعت با خود خواهد برد.

ولی انفجارهائی هستند که امواج ضربتی حاصله از آنها بطرز غیر قابل مقایسه ای پرتوان‌تر از نمونه‌ی نامبرده‌ی بالا میباشند. اگر موج‌ضربتی فشار را ۱۰ برابر کند، در جبهه‌ی موج افزایش جهشی چهار باره‌ی چگالی و ازدیاد درجه‌ی حرارت تا ۵۰۰° مشاهده میگردد. سرعت باد در این حالت به ۷۲۵ متر درثانیه میرسد. سرعت‌پخش چنین موج ضربتی برابر ۱ کیلومتر در ثانیه است.

امواج ضربتی حاصله از انفجارهای پرتوان تا دهها کیلومتر انتشار مییابند. تغییرات جهشی حاصله در اثر موج ضربتی همانند ضربتی شدید بر موانعی که سرراه موج قرار دارند وارد میآید. امواج ضربتی ضعیف

شیشه‌های پنجره‌ها را میشکنند، دیوارها را خراب میکنند، درختهارا از ریشه میکنند. تاثیر ویرانگر خمپاره‌اندازها بمیزان زیادی ناشی از عمل امواج ضربتی است.

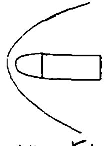
تاثیر ویرانگر امواج ضربتی به بسیاری عوامل و بویژه به طول مدت کار کرد موج بستگی شدید دارد. برای اینکه بتوانیم تصوری از بستگی تاثیر ویرانگر موج با شاخص اصلی آن، یعنی افزایش فشار هوا بدست دهیم متذکر میگردیم که موج ضربتی با جبهه‌ای به بلندی فقط ۲ در صد قادر است شیشه‌ها را بشکنند و موجی که با افزایش دوباره‌ی فشار همراه است، دیوارهای قطور را خراب میکند.

حرکت با سرعت ماورا٬صوت

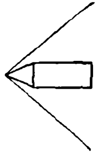
دربالا گفتیم که امواج ضربتی با سرعتهای ماورا٬ سرعت صوت انتشار مییابند. از قرار معلوم حرکت اجسام سخت در هوا با سرعت ماورا٬ صوت نیز باعث ایجاد امواج ضربتی میشود. از اینرو امواج ضربتی برای هواپیمائی معاصر دارای اهمیت زیادند.

دیر زمانی است که پرواز با سرعتهای بیش از ۳۳۰ متر در ثانیه (یعنی ۱۲۰۰ کیلومتر در ساعت) در هواپیمائی عملی شده است. حرکت هواپیماها و مرمیهای پران که فضای هوا را با سرعتهای فراتر از سدصوتی (مرز ۱۲۰۰ کیلومتر درساعت را چنین مینامند) میشکافند، با حرکاتی که در آنسوی سد صوتی قرار دارند تفاوت فاحش دارند. این تفاوت عبارت از آنستکه در مقابل جسمی که باسرعت مافوق صوت پرواز میکند موج ضربتی بوجود میآید.

شمای موج ضربتی که توسط مرمی دارای نوک مدور بوجود میآید



شکل ۱۲۹



شکل ۱۳۰

در شکل ۱۲۹ نشان داده شده‌است. جبهه‌ی موج، سطح منحنی است که از فاصله‌ی کمی جلو جسم متحرک میگذرد. این جبهه بتدریج که از خط حرکت دور میشود، از مرمی عقب میماند و دورتر میرود.

ولی در مورد جسم پران نوک‌تیز که دارای شکل معمولی مرمی (شکلی که ما با آن آشنا هستیم) میباشد، مساله بگونه‌ی دیگر است. شکل ۱۳۰ نشان میدهد که در این حالت، موج ضربتی درست «چسبیده به دماغ» مرمی است. و جبهه‌ی موج شکل مخروطی بخود گرفته است.

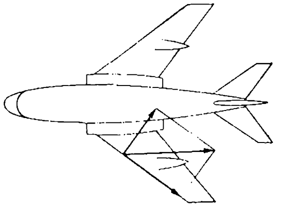
از مرمی که با سرعت مافوق صوت پرواز میکند، میشود عکسبرداری کرد. اختلاف شدید چگالیهای هوا در اطراف مرمی جبهه‌ی موج ضربتی را که توسط آن ایجاد شده است بطرزی واضح مجسم میکند. هرچه مرمی سریعتر حرکت کند، مخروط حاصل تیزتر است.

موج ضربتی منبع اصلی مقاومتی است که در مقابل جسم پران با سرعت مافوق صوت ابراز میشود. درحالیکه در مورد سرعتهای حرکت کمتر از سرعت صوت، مقاومت، بطوریکه گفته شده است، اساساً با ایجاد حرکت متلاطم بوجود میاید. بنابراین، مناسبترین اشکال جسم برای حرکت، در این دو حالت متفاوتند. آن شکلی که برای حرکات با سرعتهای مافوق صوت مناسب است برای سرعتهای کمتر مناسب نیست، و بر عکس.

جسم نوک تیز به تلاطم کمک میکند و بنابراین مقاومت در برابر حرکت با سرعتهای مافوق صوت را افزایش میدهد. و برعکس، شکل نوک تیز مقاومت موج ضربتی را کم میکند.

جسم نوک پهن، تلاطم را کم میکند و بنابر این بیشتر برای سرعتهای مادون سرعت صوت مناسب است. این شکل برای سرعتهای فراتر از سدصوتی چندان مناسب نیست، زیرا که در این حالت، موج ضربتی منبع اصلی مقاومت میشود. باینجهت مرمیهای توپ نوک تیز ساخته میشوند، چون با سرعتهای مافوق صوت حرکت میکنند.

متاسفانه از بین بردن موج ضربتی و در نتیجه لغو منبع اصلی مقاومت در برابر جسمیکه هوا را با سرعت مافوق صوت میشکافد ممکن نیست. وظیفه‌ی مهندسان هواپیما ساز و سازندگان مرمیها عبارتست، از تضعیف مقاومتی که توسط موج ضربتی ایجاد میشود.



شکل ۱۳۱

در مورد سرسیها و بدنه‌ی هواپیما کاهش مقاومت با نوک تیز کردن شکل بدست میآید. پس بالهای هواپیما چطور؟ برای آنها چه فکری میتوان کرد؟ در ده‌سال اخیر هواپیماهای مافوق صوت اشکال تازه‌ای بخود گرفته‌اند. بالها به بدنه نزدیک گشته و هواپیما سهمی شکل شده است. این تدابیر بمنظور مبارزه با مقاومت امواج ضربتی صورت گرفته اند (شکل ۱۳۱).

در اینجا مابجای اینکه به بررسی حرکت هواپیمائی که هوارا میشکافد و پیش میرود بپردازیم، جریان هوا را که بشدت به هواپیما میخورد مورد بررسی قرار میدهیم. این هر دو پدیده‌ی واحدی هستند.

در شکل ۱۳۱ هواپیمائی با بالهای کج نسبت به جریان‌هوا تصویر شده است. سرعت برداری هوای نزدیک بال را میتوان به دو بردار — یکی در طول بال و دیگری در جهت عمود بر آن تجزیه کرد. هوا در طول بال براحتی سر میخورد و این حرکت سرسره‌ای طولی نمیتواند منشأ مقاومت سهمی‌باشد. مقاومت اصلی در مقابل بال هواپیما از حرکت هوا در جهت عمود بر امتداد بال ابراز میشود. ولی این مؤلفه‌ی عرضی سرعت که هوا با آن بسوی بال حرکت میکند، میتواند خیلی کوچکتر از سرعت جبهه‌ای (سرعت اصلی) باشد. حتی ممکنست درحالیکه هوا پیما با سرعت مافوق‌صوت پرواز میکند، مؤلفه‌ی عرضی سرعت هوا نسبت به بالهای هواپیما زیر سدصوتی باشد. این کاهش سرعت عرضی باعث تضعیف امواج ضربتی و تقلیل مقاومت میشود. بهمین جهت است که هوا پیماهای مافوق صوت را سهمی شکل میسازند.

در مقابل مهندسان هواپیماساز بعلاوه این وظیفه دشوار قرار دارد

که باید اشکال میانه‌ای پیدا کنند که هم برای سرعتهای مافوق صوت و هم برای سرعتهای عادی مناسب باشند. یافتن چنین راه حل میانه لااقل به این دلیل ساده ضرورت دارد که پرواز هواپیما از فرودگاه و فرود آمدن آن، صرفنظر از اینکه هوا پیما مافوق صوت باشد یا نباشد، با سرعتهای نسبتا کم انجام میگیرد.

در حال حاضر هواپیماهای جتی هستند که با سرعت چندین هزار کیلومتر درساعت پرواز میکنند ومهندسان هواپیماساز به کار خود برای افزایش باز هم بیشتر سرعت ادامه میدهند. ولی در این راه اشکالات تازه ای پدید آمده است. مهندسان بعد از شکستن و ازمیان بر داشتن سد صوتی با سد حرارتی رو در رو شده‌اند.

هواپیماها یا موشکهای سریع‌السیر هوای مقابل خود را بشدت فشرده و متراکم میکنند. تراکم باعث افزایش حرارت میشود. هوای شکافته شده توسط جسم پران داغ میشود و در نتیجه بدنه‌ی هواپیما داغ میشود.

افزایش حرارت با مجذور سرعت هوا متناسب است. هرچه سرعت بیشتر باشد هوا داغ‌تر میشود. وقتی هواپیما به سد صوتی برسد، حرارت هوای جلو هواپیما فقط ۶۰ درجه افزایش مییابد. این مقدار افزایش حرارت اشکال عملی چندانی ندارد. ولی اگر سرعت هواپیما از دو برابر سرعت صوت تجاوز کند، هوا ۲۴۰ درجه داغ میشود واگر سرعت از سه برابر سرعت صوت بگذرد، گرمای هوا به حدود ۸۲۰ درجه‌ی سانتیگراد خواهد رسید. پرواضحست که در این درجه‌ی حرارت اشکالات تکنولوژیکی زیادی بوجود میآید.

از ارقام بالا دیده میشود که ضمن افزایش سرعت حرکت با چه سرعتی حرارت افزایش مییابد. درحین حرکت با سرعتهای حدود ۱۰ کیلومتر در ثانیه حرارت بقدری زیاد میشود که هرجسمی درآن ذوب و مبدل به گاز میگردد. از فضای عالم کاینات دائما اجسام شهابی عبارت از سنگها و سنگریزه‌ها به ابعاد مختلف داخل جو زمین میشوند. آنها با سرعتهای حدود دهها کیلومتر در ثانیه حرکت میکنند. در ارتفاع ۱۵۰ – ۲۰۰ کیلومتر از سطح زمین که رقت هوای جو کمتر میشود، این اجسام بیگانه بطرز محسوسی داغ و گداخته میشوند و در ارتفاعهای حدود ۶۰ – ۱۲۰ کیلومتر حرارتشان بقدری

بالا میرود که تبخیر میشوند. شما خودتان غالب شبها با چشم غیر مسلح از این اجسام گداخته که لحظه‌ای در آسمان خط نورانی رسم کرده و نا پدید میشوند، زیاد دیده‌اید. چنین بنظر میر سد که ستاره‌ای از آسمان سقوط کرده است. «سقوط ستاره» زیاد طول نمیکشد: جسم گداخته فقط در مدتی حدود اعشار ثانیه بچشم میآید و سپس تبخیر میشود.

احتراق و انفجار

بطور یکه میدانیم، برای اینکه احتراق شروع شود، باید کبریت مشتعلی را به شیئی قابل احتراق نزدیک کرد. ولی کبریت هم بخودی خود مشتعل نمیشود، باید آنرا به قوطی کبریت کشید. باین ترتیب برای اینکه این فعل و انفعال شیمیائی آغاز شود، گرمایش قبلی لازمست.

علت امر معلوم است. فعل و انفعال شیمیائی تغییری در استقرار ملکولها است. برای وقوع چنین تغییری حرکت نیرومند گرمائی اتمها مطلقا لازمست. بهمین جهت است که سرعت فعل و انفعالهای شیمیائی بستگی بسیار شدیدی به حرارت دارد. معمولاً ۱۰ درجه افزایش حرارت ۲ تا ٤ بار بر سرعت فعل و انفعال میافزاید.

اگر با افزایش حرارت بمیزان ۱۰ درجه سرعت فعل و انفعال فرضا سه بار افزایش میبابد، در اینصورت افزایش حرارت بمیزان ۱۰۰ درجه سرعت فعل و انفعال را $۳^{۱۰}\approx ۶۰۰۰۰$ بار، افزایش ۲۰۰ درجه بمیزان $۳^{۲۰}\approx ٤\times ۱۰^{۹}$ بار وافزایش ۵۰۰ درجه بمیزان $۳^{۵۰}$ یعنی تقریبا $۱۰^{۲٤}$ بار افزایش میدهد.

شگفتی آور نیست اگر فعل و انفعالی که در حرارت ۵۰۰ درجه با سرعت عادی انجام میشود، در حرارت معمولی اطاق اصلاً صورت نگیرد. آتش زدن، حرارت لازم برای فعل و انفعال را درلحظه‌ی ابتدائی ایجاد میکند و بعد گرمایی که در حین فعل و انفعال بوجود میآید به ایجاد درجات حرارت زیاد کمک میکند.

پیش گرم کردن موضعی ابتدائی باید بقدری باشد که ایجاد حرارت در حین فعل و انفعال از مقدار دفع گرما به محیط سرد اطراف تجاوز کند. باینجهت هر فعل وانفعالی دارای درجه حرارت اشتعال مخصوص

خود میباشد. مثلاً حرارت اشتعال چوب ۶۱۰ درجه سانتیگراد، بنزین — حدود ۲۰۰ درجه و فسفر سفید — ۵۰ درجه سانتیگراد است.

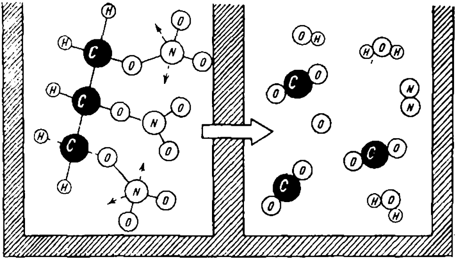
احتراق هیزم، ذغال یا نفت فعل و انفعال شیمیائی این مواد با اکسیژن هواست. باین جهت این فعل و انفعال از سطح شروع میشود و تا زمانی که قشر خارجی نسوزد، قشر بعدی نمیتواند در احتراق شرکت کند.

در تجربه میتوان بسهولت به صحت این مطلب پی برد. با خرد کردن مادهی سوختنی میتوان سرعت احتراق را خیلی زیاد کرد. بدینمنظور در بسیاری از کورهها ذغال سنگ در سوختگاه خرد میشود.

ولی در مواردی که به جوهوا نیازی نیست و کلیهی عناصر لازم برای فعل و انفعال در خود ماده وجود دارد، مساله بکلی بطرز دیگری است. نمونهی چنین مادهای مخلوط هیدرژن با اکسیژن است (آنرا گاز منفجر شونده نامند). در اینجا فعل و انفعال از سطح آغاز نمیگردد، بلکه درون ماده صورت میگیرد، برخلاف احتراق. تمام انرژی حاصل درحین فعل و انفعال تقریبا آناً بوجود میآید و در نتیجه فشار بشدت افزایش مییابد و انفجار روی میدهد. گاز منفجر شونده نمیسوزد، بلکه منفجر میشود.

بدینسان، مادهی منفجره باید در داخل خود، اتمها یا ملکولهای لازم برای فعل و انفعال را داشته باشد. امکان تهیهی مخلوطهای منفجرهی گازی مفهوم است. مواد منفجرهی جامد نیز وجود دارند. آنها فقط از این جهت مواد منفجرهاند که در ترکیب آنها کلیهی اتمهای لازم جهت فعل و انفعال شیمیائی مولد گرما و روشنائی وجود دارند.

فعل و انفعال شیمیائی که در حین انفجار روی میدهد، فعل و انفعال شکافت و تجزیه ملکول به اجزاء است. در شکل ۱۳۲ نمونهی یک فعل و انفعال انفجاری — شکافت و تجزیهی ملکول نیتروگلیسرین به اجزاء داده شده است. بطوریکه در شمای سمت راست دیده میشود، از ملکول اولیه ملکولهای گاز کربنیک، آب و آزت بوجود میآیند. در ترکیب محصولاتفعل و انفعال محصولات عادی احتراق را مییابیم، ولی احتراق بدون شرکت ملکولهای اکسیژن هوا صورت گرفت، چون کلیهی اتمهای لازم برای احتراق در درون ملکول نیتروگلیسرین موجود میباشند.



شکل ۱۳۲

در مادهی منفجره مثلاً در گاز منفجر شونده انفجار چگونه انتشار مییابد؟ وقتی مادهی منفجره را با شعله ای میسوزانند، گرمایش موضعی ایجاد میشود. در قسمت گرم شده فعل و انفعال روی میدهد، ولی درحین فعل و انفعال گرما بوجود میآید که از طریق انتقال گرما به اقشار مجاور مخلوط میرود. این گرما برای اینکه در قشر مجاور، فعل وانفعال روی دهد کافی است. مقادیر تازه گرمای حاصله به اقشار بعدی گاز منفجر شونده میر سند و باین ترتیب فعل وانفعال باسرعتی که به انتقال حرارت بستگی دارد، به تمام ماده انتشار مییابد. سرعت این انتقال حدود ۲۰ — ۳۰ متر در ثانیه است. البته، سرعت زیادیست. لولهی یک متری گاز در $\frac{۱}{۲۰}$ ثانیه منفجر میشود، یعنی انفجار تقریبا آنی صورت میگیرد. در حالیکه سرعت سوزش هیزم یا قطعات ذغال که از سطح آغاز شود، نه اینکه همهی حجم آنرا فراگیرد، در حدود چند سانتیمتر در دقیقه، یعنی هزاربار کمتر است.

ولی حتی این انفجار را هم میتوان کند نامید، چون انفجارهائی هستند که صدها بار از آن سریعتراند.

انفجار سریع با موج ضربتی شروع میشود. اگر درقشری از ماده، فشار بشدت افزایش یابد، از این محل موج ضربتی شروع به انتشار خواهد نمود. بطوریکه میدانیم، موج ضربتی باعث جهش فوقالعادهی

حرارت میشود. موج ضربتی که به قشر مجاور میآید، درجه‌ی حرارت آنرا بالا میبرد. با بالا رفتن درجه‌ی حرارت، فعل و انفعال انفجاری آغاز میگردد. انفجار سبب اعتلای فشار میشود و به موج ضربتی یاری میرساند، چون شدت آن ضمن انتشار بسرعت کاهش مییابد. باین ترتیب، موج ضربتی باعث انفجار میشود و انفجار نیز بنوبه‌ی خود به موج ضربتی برای ادامه‌ی تأثیرش کمک میکند.

انفجاری که شرح داده شد ترکش یا انفجار ضربتی (دتوناسیون) نامیده میشود. چون ترکش با سرعتهای موج ضربتی (حدود ۱ کیلومتر در ثانیه) در ماده انتشار مییابد، بنابراین از انفجار «کند» واقعا صدها بار سریعتر است.

ببینیم چه موادی «کند» و چه موادی «سریع» منفجر میشوند؟ طرح پرسش به این ترتیب صحیح نیست. چون ممکنست درماده‌ی معینی در شرایط متفاوت، هم انفجار «کند» صورت گیرد و هم ترکش (د توناسیون) روی دهد، و در پاره‌ای موارد انفجار «کند» به ترکش (د توناسیون) منجر میشود.

بعضی مواد، از جمله مثلاً یدور نیتروژن از تماس با یک ساقه‌ی نازک علف، از یک گرمایش خفیف و یا ازیک درخشش ناگهانی منفجر میشوند. در صورتیکه مواد دیگری مثلاً تروتیل را اگر به زمین پرتاب کنید و یا حتی اگر با تفنگ به آن تیراندازی کنید منفجر نمیشود. برای انفجار آن موج ضربتی قوی لازمست.

موادی وجود دارند که حساسیتشان درمقابل تاثیرات خارجی از آنهم کمتر است. مخلوط شوره‌ی آمونیاک و سولفات آمونیم که ماده‌ی کودیست، تا قبل از حادثه‌ی شومی که در سال ۱۹۲۱ در کارخانه‌ی شیمیائی شهر اپائوی آلمان روی داد. جزو مواد منفجره محسوب نمیشد. در آنجا برای خرد کردن مخلوط که انباشته شده بود، شیوه‌ی انفجاری بکار میبردند که در نتیجه، ماده منفجر شدو انبار و تمام‌کارخانه بهوا رفت. در بروز این رویداد ناگوار نمیشد مهندسان کارخانه را متهم کرد، چون تقریبا در بیست‌هزار مورد این عمل بطور عادی انجام شده و فقط در آن یکبار شرایط مساعد برای انفجار فراهم گشته بود.

موادی که فقط زیر تاثیر موج ضربتی منفجر میشوند و در شرایط

عادی پایدارند و حتی از آتش هم بیمی ندارند، برای کارهای انفجاری خیلی منا سبند. این مواد را میتوان بمقادیر زیاد تولید کرد و انبار نمود. ولی البته برای بکار انداختن، یعنی منفجر کردن این مواد منفجرهی غیرفعال باید چا شنی یا محرک انفجار بکار برد. بکاربردن انواع چاشنیها برای تحریک انفجار بعنوان منبع ایجاد موجهای ضربتی حتما لازم است.

آزید سرب یا جیوهی منفجر شونده را میتوان بعنوان چاشنی بکار برد. اگر دانهی ریزی از این مادهرا روی ورق آهن سفید بگذارید و آنرا بسوزانید، انفجاری روی میدهد که ورق آهن سفید را سوراخ میکند. انفجار این مواد در کلیهی حالات، ترکشی (دتونا سیونی) است.

اگر کمی آزید سرب را با خرج مادهی منفجره دوم مخلوط کنیم و آنرا بسوزانیم، انفجار مادهی محرک یا چا شنی موج ضربتی بوجود میآورد که برای انفجار مادهی منفجرهیدوم کافیست. عملاً انفجار بکمک کپسول منفجرکننده یا چاشنی محتوی یکی دو گرم مادهی محرک صورت میگیرد. کپسول را میتوان از فاصلهی دور، مثلاً با استفاده از فتیلهی دراز (فتیلهی بیکفورد) سوزاند. موج ضربتی حاصل از کپسول مادهی منفجرهی دومی را منفجر میکند.

در پارهای موارد لازم میآید که تکنیک با پدیدههای انفجاری مبارزه کند. مثلاً در موتور اتومبیل، «انفجار کند» مخلوط بنزین واکسیژن در شرایط عادی صورت میگیرد. ولی گاه انفجار ضربتی (دتوناسیون) هم روی میدهد. بروز امواج ضربتی اگر بصورت پدیدهی منتظمی درآید، برای موتور اتومبیل بهیچوجه مجاز نیست. چون جدار سیلندر ماشین زیر تاثیر امواج ضربتی متوالی خیلی زود از کار خواهد افتاد.

برای مبارزه با انفجارهای ضربتی در موتورها باید یا بنزین مخصوص (باصطلاح بنزین اکتان زیاد یا ضدکوبشی) بکار برد و یا اینکه بنزین را بامواد مخصوص ضد انفجار که از انتشار موج ضربتی جلوگیری میکنند مخلوط نمود. یکی از مواد ضد انفجاری که مورد استعمال زیاد دارد تترااتیل سرب است. این ماده فوقالعاده سمی است و در دستورالعمل بکاربردن آن به رانندگان اخطار میشود که در استفاده از این بنزین خیلی محتاط باشند.

در ساختمان لولهی توپ نیز باید کاری کرد که از انفجار جلوگیری شود. نباید هنگام تیراندازی در داخل لوله موجضربتی ایجاد شود، و گرنه توپ از کار خواهد افتاد.

انرژی دور و بر ما

چگونه انرژی بکار تبدیل میشود

انسان به ماشین نیازمند است. برای این کار باید به ایجاد حرکت توفیق یافت، مثلاً پیستونی را براه انداخت، چرخی را بگردش در آورد ویا واگن های قطاری را کشید. حرکت ماشین مستلزم کار است. چگونه میتوان کار را بدست آورد؟

قبلاً ما گوشزد کردیم که کار از راه تبدیل انرژی بوجود میاید. بایستی از جسم ویا از سیستمی انرژی گرفت تا کار ایجاد شود.

این دستور عمل کاملاً درست است، ولی در آن بنحوه تبدیل انرژی به کار اشاره‌ای نشده است. آیا در هر اوضاع و احوالی میتوان از جسم انرژی گرفت؟ شرایط لازم برای اینکار چیست؟ هم اکنون خواهیم دید که تقریباً تمام انرژی موجود در دور و بر ما بکلی بی‌فایده میماند، یعنی قابل تبدیل بکار نیست. اینگونه انرژی را نمیتوان درزمره ذخائر انرژی ما محسوب داشت. در اینجا میکوشیم این موضوع را مورد بررسی قرار دهیم.

آونگ منحرف شده از حالت تعادل دیر یا زود متوقف میشود؛ اگر دو چرخه‌ای را وارونه کنیم و یکی از چرخهایش را بگردش در آورده و سپس بحال خود رها نمائیم پس از ادوار متعددی از حرکت باز خواهد ایستاد. کلیه اجسام دور و بر ما که بخودی خود حرکت میکنند، سر انجام متوقف میشوند. این قانون مهم استثنا ندارد. *

---

* در اینجا البته منظور حرکت یکنواخت و مستقیم الخط و دوران یکنواخت سیستم اجسام مربوط بهم در مجموع نیست.

اگر دو جسم گرم و سرد کنار هم قرار داشته باشند، گرما از جسم اول به جسم دوم انتقال مییابد و این انتقال گرما تا ایجاد تعادل در گرماهای دو جسم ادامه دارد.

هیچگاه اجسام بخودی خود از حالت تعادل خارج نمیشوند. امکان ندارد که چرخ مستقر بر روی محوری خود بخود شروع به گردش کند و یا مثلا جوهردان واقع بر روی میز بدون سبب گرم شود:

یعنی تمایل تعادل به این معنی است که پدیده در مسیر طبیعی خود جریان مییابد: گرما از جسم گرم بسرد منتقل میشود و ممکن نیست بخودی خود عکس قضیه رخ دهد.

انرژی مکانیکی آونگ در حال نوسان در اثر مقاومت هوا و اصطکاک با محل آویزش بگرما تبدیل میشود، ولی هرگز و تحت هیچ شرائطی آونگ بحساب گرمای محیط شروع بنوسان نمیکند. اجسام بحالت تعادل میگرایند ولی هرگز بخودی خود قادر بخروج از آن نیستند.

این قانون طبیعت بلافاصله نشان میدهد که کدام بخش انرژی اطراف ما بکلی بیفایده است. این عبارت از انرژی حرکت گرمائی ملکولهای آن اجسامی است که در حالت تعادل قرار دارند. این اجسام قادر به تبدیل انرژی خود به حرکت مکانیکی نیستند.

صحبت برسر بخش بسیار عظیمی از انرژی موجود در جهان است. ما در اینجا به برآورد این انرژی «سرده» دست میزنیم. اگر دما باندازه یک درجه سانتیگراد کاهش یابد یک کیلوگرم زمین دارای ظرفیت گرمای ۰٫۲ kcal/kg، همین قدر کیلوکالری گرما از دست میدهد. رقمی است نسبتاً کم، اما به‌بینیم اگر بتوانیم ماده‌ای در جرم کره زمین یعنی باندازه ۶×۱۰^{۲۴} kg را تا یک درجه سانتیگراد سرد کنیم چقدر انرژی بدست میآید. با ضرب کردن آن در ۱٫۲ رقم عظیم $۱٫۲ \times ۱۰^{۲۴}$ kcal حاصل میشود. برای تجسم عظمت این رقم کافی است گفته شود که هم اکنون انرژی مولده تمام کارخانه‌های برق جهان هر سال در حدود $۱۰^{۱۵}$ تا $۱۰^{۱۶}$ کیلوکالری است که باندازه سه میلیارد بار کمتر از رقم بالاست.

بنابرین جای تعجب نیست اگر میبینیم که اینگونه برآوردها مثل هیپنوتیزم بر مخترعین کم اطلاع تاثیر میکند. قبلاً ما از تلاش برای ساختن گردونه جاوید («پرپتوئوم موبیله») که میبایست از هیچ کار

بیافریند یاد کردیم و متذکر شدیم که نمیتوان با بکار گرفتن احکام فیزیکی نتیجه از قانون بقای انرژی بساختن گردونه جاوید (اکنون دیگر ما آنرا گردونه جاوید نوع اول می‌نامیم) که نفی کننده خود این قانون است نائل آمد. این خطا را «مخترعین» نسبتاً فهمیده‌تر و تر دست تری که قصد ابداع موتور مولد انرژی مکانیکی بحساب تقلیل گرمای محیط را دارند تکرار میکنند. این موتور را که متاسفانه ایجاد آن غیرممکن است، گردونه جاوید نوع دوم نامند. علت عدم موفقیت در اینجا هم همان اشتباه منطقی است. چون مخترع به قوانین فیزیکی نتیجه از قانون گرایش عمومی به تعادل استناد میجوید و بکمک این قوانین در صدد نفی قانون بنیادی که همه آن قوانین بر آن اتکا دارند بر میآید.

بنابرین تنها بحساب اخذ گرما از محیط نمیتوان کار آفرید. بدیگر سخن سیستم اجسامی که نسبت بهم در حالت تعادل قرار دارند از لحاظ انرژی زائی سترون است.

برای در یافت کار قبل از هر چیز باید جسمی را پیدا کرد که با اجسام همجوارش در حالت تعادل نباشد. فقط در این صورت است که عمل انتقال گرما از جسمی بجسم دیگر و تبدیل گرما به انرژی مکانیکی با موفقیت قرین خواهد بود.

شرط لازم تولید کار ایجاد جریان انرژی است. در «مسیر» این جریان است که امکان تبدیل انرژی اجسام بکار فراهم میشود.

بنابر این، تنها انرژی اجسامی که با محیط دور و بر شان در تعادل قرار ندارند جزء ذخائر انرژی قابل استفاده انسان محسوب میشود.

گرایش به بی نظمی

اگر اجسام را بحال خود رها کنیم به تعادل میگرایند. تعادل مکانیکی و گرمائی حالت طبیعی اجسام است. تا اینجا ما با نتایج عملی حاصله از این قانون بحد کافی آشنائی یافته‌ایم. حال به‌بینیم ماهیت این قانون در چیست؟ چرا سر تا سر گیتی عرصه عبور بحالت تعادل است؟ چرا اجسامی که بحال خود گذاشته میشوند، ناگزیر بحالتی میگرایند که در آن جنبش مکانیکی متوقف میگردد و دمای آنها تراز مند میشود؟

این پرسشی است بسیار جالب و مهم و برای پاسخ بدان بایستی از گذشته دور شروع کرد.

رویدادهای عادی و مکرری را که در همه جا بچشم میخورند حوادث محتمل می‌نامند. بر عکس حوادث نامحتمل آنهائی هستند که بر اساس و انطباق نادر اوضاع و احوال بوجود آمده باشند.

رویداد نامحتمل مستلزم ظهور نیروهائی خارق العاده نیست. در آن هیچ چیز ناممکن و مغایر با قوانین طبیعت وجود ندارد. با این، در بسیاری از موارد ما رویدادهای نامحتمل را با غیرممکن عملاً یکسان میشماریم.

به جدول برد بلیط‌های بخت آزمائی بنگرید و حساب کنید که چند بلیط برنده به شماره‌های چهار یا پنج و یا شش ختم میشود. از دیدن اینکه هر کدام از آنها تقریباً یکدهم شماره‌های جدول را تشکیل میدهند دچار شگفتی نشوید.

ولی ضمنا ممکن است که بلیط های دارای نمرات مختوم به عدد ٥ بعوض یکدهم یک‌پنجم جدول را بخود اختصاص دهند، مگر نمیشود؟ خواهند گفت احتمالش کم است. خوب، پس وضعی که نیمی از بلیطهای برنده به شماره های فوق‌الذکر ختم شوند چطور؟ نه، این حالت بکلی نامحتمل است... و بنابرین غیرممکن است. اگر شرایط لازم برای محتمل بودن پدیده‌ای را مورد مداقه قرار دهیم به نتیجه زیر میرسیم: احتمال حادثه به تعداد طرقی که روی دادن حادثه را امکان پذیر میسازند بستگی دارد. هر چه تعداد این طرق بیشتر باشد، احتمال رویداد حادثه بیشتر خواهد بود.

بعبارت دقیقتر، احتمال عبارتست از نسبت تعداد طرق عملی شدن پدیده‌ی مورد نظر به تعداد راههای وقوع کلیه پدیده‌های ممکن.

شماره‌های از صفر تا ٩ را روی ده صفحه گرد مقوائی بنویسید و آنها را در کیسه‌ای بریزید. بعد آنها را هم بزنید و یک صفحه‌ی مقوائی را از کیسه در آورده، شماره آنرا بخاطر بسپارید و از نو آنرا بجای خود بر گردانید. این عمل با قرعه کشی بلیط‌های بخت آزمائی شباهت زیادی دارد. با اطمینان کامل میتوان گفت که هیچوقت یک شماره چند بار متوالی، مثلا ٧ بار پشت سر هم در نخواهد آمد، حتی اگر چندین ساعت وقتتان را هم ژرف این کار خسته کننده نمائید.

چرا؟ در آوردن ۷ شماره یکجور پشت سر هم حادثه‌ای است که جمعاً از ده طریق امکان‌پذیر است (۷ شماره صفر، ۷ شماره یک، ۷ شماره دو ... الی‌آخر)، در حالیکه مجموع حوادث ممکن $۱۰^۷$ میباشد. در نتیجه بر طبق تعریف بالا احتمال در آوردن پیاپی ۷ شماره یکجور $\frac{۱۰}{۱۰^۷}=۱۰^{-۶}$ یعنی یک میلیونیم خواهد بود.

اگر در جعبه‌ای دانه‌های سیاه و سفید ریخته و با بیلچه‌ای آنها را با هم مخلوط کنیم، بزودی دانه‌ها بطور یکدست در تمام حجم جعبه پخش خواهند شد. با در آوردن تصادفی مشتی دانه ملاحظه خواهیم کرد که تعداد دانه‌های سفید و سیاه در آن تقریباً یکی است. هر اندازه محتوی جعبه را بهم زنیم تغییری در این وضع حاصل نمیشود و یکنواختی پخش دانه‌ها محفوظ میماند. چرا دانه‌های سفید و سیاه از هم تفکیک نمیشوند؟ چرا مثلاً از طریق بهم زنی مداوم دانه‌های سیاه در بالا و دانه‌های سفید در پائین جمع نمیشوند؟ در اینجا نیز علت همان احتمال است. حالتی را که در آن، دانه‌ها بدون ترتیب خاصی پخش شده، یعنی دانه‌های سفید و سیاه در تمام حجم بطور یکنواخت پراکنده شوند، میتوان بطرق بسیار متعددی عملی ساخت و لذا احتمال آن زیاد است. بر عکس حالتی که در آن دانه‌های سیاه و سفید بترتیب در بالا و پائین قرار گرفته باشند فقط یکی است و از اینرو احتمال عملی ساختن آن بسیار ناچیز میباشد.

از دانه‌های درون جعبه گذشته و به ملکولهائی که اجسام از آنها ساخته شده‌اند میپردازیم. روش ملکولها تابع تصادف است. این امر در نمونه گازها با روشنی ویژه ای مشاهده میگردد. چنانکه میدانیم، ملکولهای گاز بدون نظم بیکدیگر بر خورد میکنند و در کلیه جهات ممکن گه با سرعتی دیگر در حرکتند. این جنبش گرمائی ابدی پیوسته مولکولها را بهم میزند و همانطور که بیلچه دانه‌های درون جعبه را با هم مخلوط میکرد آنها را در هم میآمیزد.

اطاقی که ما در آن قرار داریم مملو از هواست. چرا مثلاً چنین پیش آمدی رخ نمیدهد که در لحظه معینی همه مولکولها از نیمه‌ی پائین اطاق به نیمه بالائی آن یعنی زیر سقف تغییر مکان دهند؟ اصولاً چنین حالتی غیر ممکن نیست، اما بسیار کم احتمال است. یعنی بسیار

کم احتمال بودن چیست؟ اگر چنین پدیده‌ای حتی یک میلیارد بار هم کمتر از پخش با منظم مولکولها محتمل بود، بالاخره میبایستی کسی به مشاهده آن توفیق می‌یافت شاید در زندگی ما چنین پدیدای روی دهد؟ محاسبه نشان میدهد که چنین پیش آمدی برای ظرف دارای حجم $1cm^3$ یکبار در هر $10^{30000000000000000}$ مورد رخ میدهد. گمان نمیرود که با این وصف ضرورتی باشد به اینکه بین واژه‌های بسیار نامحتمل و «غیرممکن» تفاوت قائل شد. عدد بالا بطور سرسام آوری عظیم است. اگر آنرا نه تنها به تعداد اتم‌های موجود در زمین بلکه به تعداد اتم‌های منظومه شمسی نیز تقسیم کنیم باز هم عدد بزرگی میشود.

پس مولکولهای گاز چگونه حالتی خواهند داشت؟ حالت حداکثر محتمل. و این حالتی است که بحداکثر طرق امکان پذیر میباشد، یعنی همان حالت پراکندگی نامنظم مولکولها که در آن تعداد مولکولهای متحرک بر است و بچپ و ببالا و پائین تقریباً متعادل بوده و در هر بخشی از حجم تعداد کل آنها یکسان و نسبت در صد مولکولهای سریع و کند مساوی است. هر گونه انحراف از این بی‌نظمی، یعنی از آمیختگی یکدست و نامنظم مولکولها چه از لحاظ محل وقوع و چه از نظر سرعت حرکت، بمعنی کاهش احتمال است و خلاصه، رویدادی است نامحتمل.

بر عکس پدیده‌هائی که با اختلاط و در هم ریختن ، با ایجاد بی نظمی از حالت نظم مربوطند، احتمال وقوع حالت را افزون میسازند.

پس معلوم شد که این پدیدها تعیین کننده سیر طبیعی حوادثند. بنابر این قانون عدم امکان گردونه جاوید نوع دوم و قانون گرایش عمومی به تعادل را نیز میتوان توضیح داد. چرا انرژی مکانیکی به گرمائی تبدیل میشود؟ چون حرکت مکانیکی از نظم بر خوردار است و حرکت گرمائی نامنظم است. گذر از نظم به بی نظمی احتمال حالت را ارتقاء میدهد.

فیزیکدانان غالباً از کمیت کمکی که بنام انتروپی مشهور است استفاده میکنند. انتروپی معرف درجه نظم است بوسیله فرمول ساده‌ای با تعداد طرق وقوع حالت مربوط میباشد. در اینجا ما از ذکر این

فرمول صرفنظر میکنیم و تنها خاطر نشان میسازیم که هر قدر احتمال بیشتر باشد انتروپی نیز زیادتر است.

قانون طبیعت که اکنون مورد بحث ماست حاکی از آنستکه: تمام جریانهای طبیعی چنان روی میدهند که احتمال وقوع حالت افزایش مییابد. بدیگر سخن این قانون بشکل قانون افزایش انتروپی فرمولبندی میشود.

قانون افزایش انتروپی مهمترین قانون طبیعت است: عدم امکان ایجاد گردونه جاوید نوع دوم ویا حکم منبی بر گرایش به تعادل اجسامی که بحال خود رها شده‌اند از جمله‌ی احکام ناشی از این قانون میباشند.

قانون افزایش انتروپی را که اصل دوم ترمودینامیک (ترمودینامیک عبارت از آموزش در باره گرما) مینامند. اصل اول ترمودینامیک همان قانون بقای انرژی است.

اطلاق «اصل ترمودینامیک» بداین قوانین طبیعت ریشه‌ی تاریخی دارد. نمیتوان گفت که تجمع این دو قانون در زیر عنوانی واحد چندان مناسب است چون قانون بقای انرژی قانون مکانیکی است که چه اجسام بزرگ و چه اتمها و مولکولهای جداگانه همه بیچون و چرا از آن تابعیت میکنند، در حالیکه قانون افزایش انتروپی چنانکه از گفته های بالا بر میآید، تنها بر مجموعه‌های بحد کافی بزرگ ذرات تعمیم‌پذیر است و فرمولبندی آن برای ملکولهای جداگانه غیرممکن میباشد.

جنبه آماری (استاتیستیکی) اصل دوم ترمودینامیک که بمعنای همان امکان کاربردش بر مجموعه‌های بزرگ ذرات است، بهیچوجه از اهمیت آن نمیکاهد. قانون افزایش انتروپی سمت جریانها را از پیش تعیین میکند. از این نظر انتروپی را میتوان مدیر عامل ثروتهای طبیع نامید که انرژی در خدمتش بعنوان حسابدار انجام وظیفه میکند.

افتخار کشف این قانون مهم متعلق به کیست؟ در اینجا تنها بذکر یک نام قناعت نتوان کرد. اصل دوم ترمودینامیک دارای تاریخچه ویژه است.

همانطور که در مورد تاریخچه اصل یکم ترمودینامیک متذکر شدیم در اینجا نیز بایستی یکبار دیگر از نام «سادی کارنو» ی فرانسوی یاد کرد. وی در سال ۱۸۲٤ بهزینه خود کتابی بنام «تفکر



رودلف کلاوزیوس فیزیکدان و تئوریسین برجسته آلمان که بین سالهای ۱۸۲۲ تا ۱۸۸۸ میزیست برای نخستین بار اصل دوم ترمودینامیک را بروشنی تعریف کرد: ابتدا در سال ۱۸۵۰ بصورت حکم مربوط به عدم امکان انتقال خود بخودی گرما از جسم سردتر به گرم‌تر و سپس در سال ۱۸۶۵ بکمک مفهومی که خود وی بمیان آورده بود، یعنی انتروپی. کلاوزیوس از نخستین کسانی بود که بمسائل مربوط به ظرفیت گرمای گاز چند اتمی و عموماً گرمارسانائی گازها توجه نمود. آثار کلاوزیوس در باره تئوری سینتیک گازها به پیشرفت تصورات آماری نسبت به جریانهای فیزیکی بسیار کمک کرد. کلاوزیوس مؤلف چند اثر جالب در باره پدیده‌های الکتریکی و مغناطیسی است.

در باره نیروی محرکه آتش» بچاپ رساند. در این اثر برای نخستین بار قید شده بود که بدون صرف کار گرما از جسم سرد به گرم انتقال پذیر نیست. کارنو همچنین نشان داد که ضریب حداکثر کارآئی ماشین حرارتی (ذیلا خواهد آمد) تنها با اختلاف دمای جسم گرمساز و محیط سرد تعیین میشود.

تنها در سال ۱۸۳۲، یعنی پس از مرگ کارنو فیزیکدانان دیگر توجه خود را باثروی معطوف داشتند. اما از آنجا که کلیه تتبعات کارنو بر پایه‌ی شناسائی «ساده‌ای» که نه ویرانی پذیر است و نه ایجاد شدنی، یعنی «ساده گرمازا» متکی بود، تاثیر زیادی بر پیشرفت دانش نداشت.

تنها پس از تحقیقات «مایر»، «جول» و «هلمهولتس» که نتیجه آن کشف قانون همسنگی کار و گرما بود، فیزیکدان بزرگ آلمانی رودلف کلاوزیوس (۱۸۲۲ تا ۱۸۸۸) به اصل دوم ترمودینامیک رسید و تعریف ریاضی آنرا بدست داد. کلاوزیوس مفهوم انتروپی را بمیان کشید و نشان داد که مضمون اصل دوم ترمودینامیک در ناگزیری افزایش انتروپی در تمام جریانهای واقعی خلاصه میشود.

اصل دوم ترمودینامیک امکان فرموله کردن چند قانون عمومی را که تمام اجسام صرفنظر از ساختمان خود باید تابع آنها شوند فراهم میسازد. مع الوصف هنوز مسأله مربوط به چگونگی ارتباط بین ساختار جسم و خواص آن بصورت پرسشی بدون پاسخ باقی میماند که پاسخ بدان درحیطه اختیار یکی از مباحث فیزیک معروف به فیزیک آماری است.

واضح است که در محاسبه‌ی مقادیر فیزیکی معرف سیستمی مرکب از میلیادها میلیارد ذرات بکار بردن شیوه‌ی کاملاً نوینی لازم است. بررسی حرکات یکایک ذرات و تشریح آنها بکمک فرمولهای مکانیکی نه فقط امری مطلقا نا ممکن، بلکه بی معنی است. اما همین کثرت عظیم ذرات امکان کاربرد شیوه‌های نوین آماری را برای مطالعه اجسام فراهم میسازد. این شیوه‌ها بطور وسیعی از مفهوم رویداد محتمل استفاده میکنند. بنیان فیزیک آماری را فیزیکدان اطریشی «لودویگ بولسمان» که در سالهای ۱۸٤٤ تا ۱۹۰٦ میزیست گذاشت.

بوسمان در چندین اثر چگونگی امکان کاربرد شیوه‌های مذکور را در مورد گارها نشان داد.

در سال ۱۸۷۷ بولسمان نتیجه منطقی پژوهشهای خود را بشکل

تغییر آماری اصل دوم ترمودینامیک ارائه نمود. فرمولی که بیانگر رابطه انتروپی و احتمال حالت سیستم است بر پایه‌ی مجسمه یاد بود بولسمان حک شده است.

اهمیت شجاعت علمی بولسمان را که رهگشائی نوین در فیزیک بود بزحمت میتوان ارزیابی نمود. پژوهشهای بولسمان در دوران حیات وی در معرض انواع نیشخندها و تمسخرات پروفسورهای محافظه کار آلمانی قرار گرفت: در آن زمان تصورات اتمی و ملکولی را بسیاری ساده‌لوحانه و غیر علمی می‌پنداشتند. بولسمان دست بخود کشی زد و بدون شک در این کار محیط تاثیر کمی نداشت.

بنای فیزیک آماری بمیزان قابل توجهی بوسیله فیزیکدان برجسته امریکائی «جوزای ویلارد گیبس» (۱۸۳۹ — ۱۹۰۳) تکمیل شد. گیبس به تعمیم شیوه‌های بولسمان پر داخته و نحوه اشاعه بر خورد آماری را بتمام اجسام نشان داد.

آخرین اثر گیبس در اوائل سده بیستم از طبع خارج شد. گیبس پژوهشگری بسیار فروتن بود و معمولاً اثار خود را در مجله خبری یکی از دانشگاههای کوچک ایالتی بچاپ میرساند. از اینرو سالهای مدیدی سپری شد تا اینکه همه فیزیکدانان توانستند از پژوهشهای وی با خبر شوند و آنها را مورد بررسی قرار دهند.

فیزیک آماری راهی را نشان میدهد که با تعقیب آن امکان محاسبه خواص اجسام متشکل از تعداد معنی ذرات فراهم میشود البته نباید گمان کرد که این شیوه‌های محاسبات حلال همه مشکلاتند. اگر خصلت حرکت اتمها در جسم خیلکی پیچیده باشد (همانطور که در مورد مایعات دیده میشود) محاسبه واقعی عملاً امکان‌ناپذیر میگردد

توان

برای قضاوت در باره امکان کار آبی یک ماشین و همچنین در باره مصرف کار از مفهوم توان استفاده میشود. توان کاریست که در واحد زمان انجام میگیرد.

برای سنجش توان آحاد اندازه‌گیری مختلفی وجود دارد. در

سیستم CGS واحد توان erg/sec است. منتهی یک erg/sec بعلت قلت خود برای مقاصد عملی مناسب نیست و از اینرو واحد توانی که با تقسیم جول بر ثانیه بدست میآید بیشتر متداول است. این واحد بنام وات (W) نامیده میشود.

$$۱\ W = ۱\ J/sec = ۱۰^{۷}\ erg/sec$$

در صورتیکه این واحد نیز کم باشد آنرا ضرب در هزار نموده و از کیلووات استفاده میکنند.

واحد توان دیگر معروف به اسب بخار نیز از گذشته بیادگار مانده است. زمانی در آغاز تکامل تکنیک، این اصطلاح حاوی مضمون عملی بود. خریدار ماشین حتی اگر در باره آحاد توان هم تصور جامعی نداشت پیش خود اینطور فکر میکرد که مثلاً ماشین ده اسب بخار جای ده اسب را میگیرد.

بدیهی است که اسبها با هم فرق دارند. از قرار معلوم، بانی این نخستین واحد توان فرض میکرد که یک اسب «متوسط» قادر است در یک ثانیه کاری معادل ۷۵ کیلوگرم متر انجام دهد. و همین واحد مورد قبول واقع شد که در محاسبات مختلف بکار برده میشود.

$$۱\ \text{اسب بخار} = ۷۵\ kgfm/sec$$

اسبهای بارکش قوی البته قادر بایجاد کار بیشتری هستند، مخصوصاً در لحظه تکان خوردن از جا اما توان یک اسب متوسط به ۱/۲ اسب بخار نزدیکتر است. با تبدیل اسب بخار به کیلوات بدست میآید که یک اسب بخار برابر ۰٫۷۳۵ کیلووات میباشد.

در پراتیک روز مره و در تکنیک ما با موتورهای دارای توانهای مختلف بر خورد میکنیم. توان موتور کوچک گراموفون از ۱۰ وات متجاوز نیست، توان موتور اتومبیل ولگا ۷۵ اسب بخار یعنی ۵۵ کیلووات و توان موتور هواپیمای مسافربری «ایل — ۱۸» ۱۶۰۰۰ اسب بخار است. یک کارخانه برق کلخوزی کوچک دارای توانی معادل ۱۰۰ کیلووات است. در حالیکه توان نیروگاه برق آبی کراسنویارسک به ۵ میلیون کیلووات میرسد.

آشنائی با آحاد توان فوق‌الذکر ما را به فکر واحد دیگر انرژی که در

تمام نقاط نصب برق شمار بدان بر میخوریم میاندازد. این واحد همان کیلووات ساعت است. یک کیلووات ساعت کاری است که طی یک ساعت بوسیله توان یک کیلوواتی انجام می‌پذیرد. تبدیل این واحد به آحادی که قبلاً با آنها آشنا شدیم کاری است ساده:

$$1\ \text{kW ساعت} = 3{,}6 \times 10^{6}\ \text{J} = 861\ \text{k cal} = 367000\ \text{kgfm}$$

است.

خواننده ممکن است پرسد ایا واقعاً با وجود اینهمه واحدهای انرژی بازهم واحد دیگری لازم بود؟ مفهوم انرژی به بخش های گوناگون فیزیک راه یافته و فیزیکدانان بخیال تسهیل کار در همه جا دست بدامن آحاد جدید زدند تا اینکه بالاخره وفور آنها باعث ایجاد مشکلاتی شد که در نتیجه، لزوم کار برد یک واحد عمومی انرژی مورد تصدیق همگان قرار گرفت و بالاخره سیستم آحاد SI (به صفحه ۱۶ نگاه کنید) این معضل را حل نمود. اما هنوز زمانی دراز لازم است تا آحاد «قدیمی» جای خود را به برگزیده نیکو اقبال بسپارند، از اینرو کیلووات ساعت هنوز آخرین واحد انرژی نیست که در جریان آموزش فیزیک بایستی با آن آشنا شویم.

ضریب کارآیی

بکمک ماشین های گوناگون میتوان منابع انرژی را به تولید کارهای مختلف از قبیل: بلند کردن محمولات، بحرکت درآوردن دستگاه و حمل و نقل بار و مسافر واداشت.

اگر به محاسبه مقدار انرژی مصرفی و کاری که ماشین پس میدهد بپردازیم خواهیم دید که رقم اولی همیشه بیشتر است، لذا قسمتی از انرژی در ماشین ضایع میشود.

در هر ماشینی سهم انرژی که تماما مقاصد مورد نیاز ما مورد استفاده قرار میگیرد، کارایی نامیده میشود. این ضریب معمولاً بشکل نسبت در صد نشان داده میشود.

برای مثال ضریب کارآئی ٪۹۰ بدانمعنی است که ماشین تنها ٪۱۰

26*

انرژی دریافتی را ضایع میسازد و ضریب کارایی ۱۰٪ عکس قضیه را میرساند و حاکی از اتلاف ۹۰ در صد از انرژی دریافتی است.

در مورد ماشین هائی که انرژی مکانیکی را بکار مبدل میسازند، ضریب کارآئی را میتوان اصولاً خیلی بالا برد. در این ماشین ها افزایش ضریب کارائی از طریق مبارزه با اصطکاک اجتناب ناپذیر عملی میگردد. بهبود کیفیت روغن کاری کاربرد یا تاقانهای کاملتر، تقلیل مقاومت محیطی که در آن حرکت رخ میدهد فهرست اقداماتی هستند که ضریب کارآئی را به رقم ایده آل ۱۰۰٪ نزدیک میسازند.

معمولاً ضمن تبدیل انرژی مکانیکی بکار بعنوان مرحله بینابینی از انتقال الکتریکی استفاده میشود (مثل نیروگاههای برق آبی). بدیهی است که این کار نیز ضایعاتی اضافی در بر دارد، اما مقدار آنها زیاد نیست و ضایعات تبدیل انرژی مکانیکی به کار را حتی ضمن استفاده از انتقال الکتریکی نیز میتوان بچند در صد رساند.

در مواردی که ماشین انرژی شیمیائی ماده را مورد استفاده قرار میدهد وضع کاملاً متفاوتی حکمفرماست.

تا بحال ماشین هائی با مقیاس کار وسیع وجود ندارند که از عهده تبدیل مستقیم انرژی سوخت به انرژیهای مکانیکی و یا الکتریکی بر آیند. از اینرو فعلاً مرحله بینابینی تبدیل انرژی شیمیائی به انرژی حراتی اجتناب ناپذیر است. با استفاده از این شیوه برای دریافت کار از مادهی سوخت باید آنرا سوزاند و در حجم معینی (در کوره) درجات حرارت زیاد بوجود آورد.

اساس کار ماشین های گرمائی بر اصل ایجاد اختلاف دمای کوره و محیط اطراف استوار است. این ماشین بخشی از انرژی گرمائی را گرفته و بکار تبدیلش میکند، منتهی فقط بخشی از .ن را، نه همه آنرا.

اگر اختلاف دما چندان زیاد نباشد تنها بخش کوچکی از انرژی قابل استفاده خواهد بود و در شرائط برابری گرمای کوره و محیط اطراف آن امکان گرفتن گرما از کوره بکلی منتفی خواهد شد. خلاصه هر چه اختلاف دما بیشتر باشد بخش تبدیلی انرژی گرمائی بکار نیز بیشتر خواهد بود. بنابر این برای نیل به کارآیی بیشتر بایستی اختلاف دما را بین منبع گرما و محیط تا حد ممکن [illegible]ایش داد.

اختلاف دما همیشه حدی برای امکانات تکمیل ماشین های گرمائی

معین میکند. حتی اگر تمام تلفات درونی ماشین را از بین ببریم، یاتاقانهای ایده‌آل بسازیم و از مواد عایق و رسانای گرمای ایده‌آل که در طبیعت وجود ندارند استفاده کنیم، باز هم کارآئی به صد درصد یا واحد نخواهد رسید و تنها به حد اکثر خود خواهد رسید.
این مقدار حد کارآئی در شرایط تبدیل بکار جریان گرمائی که از جسم گرم شده با دمای T_1 به محیط واقع در دمای T_0 در حرکت است برابر خواهد بود با:

$$\left(1-\frac{T_0}{T_1}\right)$$

بعنوان مثال، اگر دمای منبع جریان گرما ۱۰۰°C و محیط ۲۰°C باشد حد فوقانی ضریب کارآئی $\left(1-\frac{۲۹۳}{۳۷۳}\right)$، یعنی ٪۲۰ خواهد بود و در صورت ارتقاء دمای منبع تا ۱۰۰۰°C به ٪۷۶ خواهد رسید.

واضح است که نحوه سوزاندن سوخت باید طوری باشد که تا حد ممکن موجب ایجاد دمای فراتری شود. حتماً از آنچه که در بالا گفته شد روشن میشود که کاربرد جریان گرمائی در ایجاد کار مکانیکی تا چه حد فاقد صرفه است. در بهترین توربین های گاز معاصر (به صفحه ۴۲۶ نگاه کنید) ضریب کارآئی قریب ٪۴۵ است. برای دستیابی به کارآئی زیاد بایستی تبدیل بلاواسطه انرژی شیمیائی به کار مکانیکی بدون گذ راندن مرحله‌ی بینابینی تبدیل گرمائی را فرا گرفت. ما میدانیم که از این طریق تبدیل مستقیم اصولاً ممکنست از تلفات انرژی احتراز شود. اما چنانکه گفته شد، این مسأله از لحاظ فنی هنوز حل نشده است.

منابع انرژی روی زمین

همه منابع انرژی گرد ما دارای ارزش یکسانی نیستند. پاره‌ای از آنها از نظر اصولی جالبند، و برخی دیگر هستند که وجود تمدن بشر به آنها وابسته است. برخی از منابع عملاً پایان‌ناپذیرند و برخی دیگر طی سده‌ها و یا حتی دهه‌های آینده تمام میشوند.

اکنون میلیاردها سال است که ولینعمت بزرگ منظومه شمسی ما خورشید بیدریغ پرتو حیاتبخش خود را به زمین روانه میدارد. این منبع انرژی را بجرأت می‌توان پایان‌ناپذیر خواند. هر متر سربع از سطح زمین در هر ثانیه بطور متوسط از خورشید ۱٫۵ کیلوات انرژی دریافت میکند. مقدار این انرژی سالانه تقریبا به ۱۰ میلیون کیلوکالری میرسد. برای دستیابی بمعادل این انرژی باید صدها کیلوگرم ذغال سوزاند. تمام کره زمین چقدر گرما از خورشید میگیرد؟ با محاسبه سطح کره‌ی زمین و در نظر گرفتن ناهمگونی استفاده از تشعشعات خورشید به رقمی بالغ بر ۱۰^۱۴ کیلوات میرسیم که صد هزار بار بیش از مجموعه انرژی است که کلیه فابریکها و کارخانجات، نیروگاههای برق و موتورهای اتومبیل‌ها و هواپیماهای موجود از کلیه منابع انرژی کره زمین دریافت میدارند و یا بعبارت دیگر صد هزار بار بیشتر از توان انرژی مصرفی همه انسانهای ساکن کره زمین (حدود یک میلیارد کیلوات) می‌باشد.

اما تا کنون علیرغم وجود طرحهای فراوان، انرژی خورشید بمیزان بسیار ناچیزی مورد استفاده قرار میگیرد. درست است که برآوردن این انرژی در بالا رقم عظیمی را بدست داد، اما نباید فراموش کرد که این مقدار انرژی بتمام سطح زمین — هم به دامنه‌های کوههای غیر قابل دسترسی، هم بر سطح اقیانوسهائی که قسمت اعظم کره ما را دربر میگیرند و هم به شنهای بیابانها و صحاری غیر مسکون تعلق میگیرد.

بعلاوه مقدار انرژی که به مساحات نسبتا کوچک تعلق میگیرد آنقدرها هم زیاد نیست و ضمنا ایجاد گیرنده‌های انرژی گسترده در مساحاتی بوسعت چندین کیلومتر مربع از لحاظ اقتصادی بعید است که مقرون بصرفه باشد. بالاخره این مسلم است که تبدیل انرژی خورشید به گرما در نقاطی که روزهای آفتابی زیاد دارند، دارای پایه‌ی صحیح و منطقی است.

در این اواخر بعلت امکان تبدیل مستقیم انرژی خورشیدی به برق، گرایش بسوی آن افزایش یافته است. البته در جالب توجه بودن این امکان تردیدی نیست، ولی در راه عملی ساختن آن تا کنون گامهای ناچیزی برداشته شده است.

تازگیها معلوم شد که در بالای سرما، در اقشار فوقانی جو زمین، آکومولاتور بزرگ انرژی خورشید وجود دارد. از قرار معلوم، اکسیژن واقع در ارتفاعات ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلومتر بر فراز سطح زمین تحت تاثیر تشعشع خورشیدی در حالت تجزیه قرار دارد، یعنی سولکولهای آن به اتمهای مجزا تقسیم شده‌اند. اگر این اتمها بصورت سلکولهای اکسیژن متحد شوند، انرژی معادل 118 kcal/mol آزاد میشود. ذخیره‌ی کلی این انرژی چقدر است؟ این انباشت انرژی در قشری از جو بضخامت ۵۰ کیلومتر و واقع در ارتفاعات مذکور به 10^{13} کیلوکالری میرسد. برای ایجاد این مقدار انرژی سوزانیدن چندین ملیون تن ذغال لازم است که برابر با میزان استخراج چندروزه آن در اتحاد شوروی می باشد. با وجودیکه انرژی اکسیژن تجزیه شده در ارتفاعات زیاد بدون وقفه تجدید میشود، بعلت تراکم نازل آن اختراع وسیله استفاده از آن چندان هم آسان نیست.

برسیگردیم به بحث درباره منابع دیگر انرژی. در جو زمین توده‌های هوا دائما در حال حرکتند. گردبادها، طوفانها، بادهای دائمی و نسیم‌های ملایم همگی نمودارهای گوناگون انرژی جریانات جوی می‌باشند. انرژی باد از سده‌های باستان برای حرکت کشتی‌های بادبانی و چرخاندن آسیاهای بادی مورد استفاده قرار میگرفت. میانگین سالانه میزان کل توان جریانات جوی به رقم عظیم ۱۰۰ میلیارد کیلووات سر میزند، ولی به این منبع انرژی نیز امید و دلبستگی زیادی نمیتوان داشت. علاوه بر نامطمئن بودن باد که در دوران تسلط کشتی‌های بادبانی بارها با فرونشست و آرامش خود باعث فلاکت‌های بسیار شد، این منبع نیز همان کمبود انرژی خورشیدی را که قلت تراکم انرژی است، دارا می‌باشد. مثلاً پره‌های توربین بادی مختص ایجاد انرژی در مقیاس یک کارخانه امروزی چنان اندازه‌ای بهم میگرفت که ساختن آن تنها در عالم خیال میسر است. فقدان ثبات نیز از نواقص دیگر نیروی باد است. بدین سبب تا کنون انرژی باد، و باصطلاح شاعرانه — ذغال نیلگون تنها در ماشین‌های کوچک مورد استفاده قرار میگیرد. هنگام وزش باد این ماشین‌ها برای برخی مصارف کشاورزی و روشنائی منازل برق تولید میکنند. اگر انرژی مازاد بر مصرف تولید شود، این انرژی برای استفاده از آن بهنگام آرامش باد، در آکومولاتورها

(دستگاههای مخصوص حفظ و نگهداری برق را چنین مینامند) ذخیره میگردد. بدیهی است که به مولدهای بادی نمیشود اطمینان کرد و روی آنها حساب نمود. آنها فقط می‌توانند نقش کمکی داشته باشند.

آب متحرک: امواج دریاها بهنگام جز رومد و جریان آب رودخانه‌ها که به دریاها و اقیانوسها میریزند نیز از منابع سرشار انرژی رایگان بشمار میآیند.

توان کلیه رودخانه‌های زمین را میلیاردها کیلووات برآورده کرده‌اند که فعلاً فقط یک درصد یعنی رقمی در حدود ۴۰ ملیون کیلووات از آن مورد بهره‌برداری است. توان بالقوه رودخانه‌های شوروی ۴۰۰ ملیون کیلووات است که تا کنون ۲۰ ملیون کیلووات آن مورد استفاده قرار گرفته است.

امروز اگر ما ناگهان از ذغال سنگ و نفت و دیگر منابع انرژی محروم شویم و تنها راه استفاده از ذغال سفید یعنی انرژی رودخانه‌ها برویمان باز بماند، حتی بفرض استفاده کامل از آن که با ساختن کلیه نیروگاههای ممکن میسر میشود، ناگزیر بکاهش مصرف انرژی مجبور خواهیم بود. در زمان حاضر مصرف انرژی در جهان از مرز یک میلیارد کیلووات گذشته است. با میزان کنونی مصرف انرژی بهره‌گیری منحصر به انرژی رودخانه‌ها دیگر بزحمت احتیاجات بشر را تأمین خواهد کرد.

اگر انرژی جزرومد را هم در نظر بگیریم چه؟ این انرژی با اینکه تقریباً ده بار از انرژی رودخانه‌ها کمتر است باز هم درخور توجه میباشد. متاسفانه تا کنون از این منبع انرژی بمیزان بسیار ناچیزی استفاده میشود. خصلت ضربانی متناوب جزرومد مشکلی در راه استفاده از آن بشمار میاید، ولی مهندسین شوروی و فرانسوی راه عملی از میان برداشتن این مشکل را یافتند. اکنون دیگر می‌توان گفت که نیروگاه برق جزر و مدی قادر به تامین برق تضمین‌شده‌ای برای ساعات حداکثر مصرف می‌باشد.

در ژرفاهای زیاد، درجه حرارت آب اقیانوسها با درجه حرارت در سطح آب باندازه ۱۰ تا ۲۰ درجه سانتیگراد تفاوت دارد. روی این اصل میتوان به ایجاد ماشینهای گرمائی دست زد که گرماده آن در عرضهای جغرافیائی وسطی اقشار سطحی و سردکننده آن اقشار عمقی آب باشند.

ضریب کارآئی چنین ماشینی از دو درصد بالاتر نخواهد بود، ولی مشکل عمده در اینجا باز همان عدم‌تراکم انرژی است.

خورشید، هوا و آب منابع رایگان انرژی هستند*. رایگان بدانمعنی که مصرف این منابع کاهش هیچیک از مواد ارزنده زمینی را دربر ندارد. کار ماشین بادی از مقدار هوا نمی‌کاهد و نیروگاههای برق رودخانه‌ای موجب کم شدن میزان آب و کاهش عمق رودخانه‌ها نمیشوند و در کار ماشین‌های خورشیدی نیز ذخائر زمینی مورد استفاده قرار نمیگیرند.

برتری شایان توجه منابع مشروح در بالا در مقایسه با مواد سوختنی در همین است. ماده سوخت سوزانده شده و از بین میرود. استفاده از ذغال سنگ، نفت و چوب با نابودی جبران‌ناپذیر منابع ارزشمند کره زمین توام است. بسیار جالب بود اگر ساختمان موتور فتوشیمی بمرحله‌ی عمل درمیآمد، یعنی با استفاده از مکانیسم فتوسنتز (نورساخت) که انباشت انرژی ماده‌ی سوخت را تامین میکند، انرژی بدست میآمد. برگ سبز هر گیاهی کارخانه‌ایست که از ملکولهای آب و انیدرید کربنیک بیاری انرژی اشعه خورشید مواد آلی میسازد که در ملکولهایشان ذخیره‌ی فراوان انرژی اندوخته میکنند. ضریب کارآئی این جریان در گیاهان کم است و یک درصد تجاوز نمیکند. با وجود این ذخیره سالانه انرژی بوسیله گیاهان برابر 2×10^{15} کیلووات ساعت میباشد که صدها بار بیشتر از مجموع نیروی برق تولیدی همه نیروگاههای جهان است. مکانیزم فتوسنتز هنوز تماماً روشن نشده است، اما شکی نیست که در آینده انسان نه تنها به عملی ساختن فتوسنتز در شرایط مصنوعی توفیق خواهد یافت، بلکه ضمناً کارآئی آن را نیز ارتقاء خواهد داد. اما فعلاً در این عرصه انسان قادر به زورآزمائی با طبیعت نیست و ناگزیر است که به استفاده از عطایای آن که بشکل چوب، نفت و ذغال در دسترس اوست قناعت ورزد.

میزان ذخائر سوخت در کره زمین چه اندازه است؟ ذغال و نفت به سوخت عادی، یعنی سوختی که با نزدیکی شعله بدان محترق میشود تعلق دارند و ذخیره آنها روی زمین بسیار محدود است. سرعت مصرف

---

* البته خورشید را نمی‌توان با منابع دیگر در یک ردیف قرار داد. چون بطور کلی خورشید سرچشمه کلیه دیگر انرژیها است.

کنونی نفت در جهان بحدی است که منابع مکشوفه تا اوائل هزاره میلادی آینده تمام خواهد شد ذخائر ذغال سنگ تا حدی بیشتر و رقمی در حدود ده هزار میلیارد تن را تشکیل میدهد. یک کیلوگرم ذغال سنگ هنگام سوختن ۷۰۰۰ کیلوکالری گرما تولید میکند. بنابر این ذخیره کل انرژی ذغال سنگ معادل ۱۰^۲۰ کیلوکالری است. این رقم هزار بار از مصرف سالانه انرژی در سطح کنونی آن بیشتر است.

ما ذخیره انرژی برای هزار سال را باید کم شمرد. هزار سال در مقایسه با طول عمر یک انسان زیاد است، ولی طول عمر یک انسان نسبت به عمر کره زمین و وجود جهان متمدن لحظه ناچیزی بیش نیست. علاوه بر این مصرف سلانه انرژی مدام در حال افزایش است. از اینرو اگر ذخائر سوخت تنها منحصر به نفت و ذغال سنگ باشد، وضع کره زمین را از لحاظ ذخایر انرژی باید فاجعه‌آمیز شمرد.

در اوائل سالهای چهل سده اخیر امکان استفاده از سوخت جدیدی که سوخت هسته‌ای می‌باشد عملاً به ثبوت رسید. ما ذخایر قابل توجهی از سوخت هسته‌ای در اختیار داریم.

در اینجا از توضیح ساختمان اتم و هسته آن و چگونگی دستیابی به انرژی درونی هسته صرفنظر میکنیم. انرژی هسته‌ای تنها در نیروگاههای برق اتمی بمیزان قابل توجهی بدست میآید. در این نیروگاهها انرژی هسته‌ای بصورت گرما بدست میآید و نحوه استفاده بعدی از آن با آنچه که در نیروگاههای حرارتی عادی میگذرد تفاوتی ندارد.

در زمان حاضر ما قادریم در ابعاد لازم برای استفاده صنعتی از دو عنصر اورانیوم و توریم انرژی هسته ای بدست آوریم. ویژگی سوخت هسته‌ای که در عین حال برتری اصلی آنرا نیز تشکیل میدهد همان تراکم فوق‌العاده انرژی در آنست. یک کیلوگرم سوخت هسته‌ای باندازه ۲٫۵ میلیون بار بیش از مقدار ذغال سنگ هموزن خود انرژی تولید میکند. از اینرو علیرغم گسترش نسبتاً کم این عناصر، ذخایر آنها در کره زمین از لحاظ اندوخته انرژی شایان توجه است. برآوردهای تقریبی نشان میدهند که ذخائر سوخت هسته‌ای بمیزان معتنابهی از ذخائر ذغال سنگ بیشتر است. اما با داخل شدن اورانیم و توریم به جرگه‌ی مواد سوخت، باز هم مشکل قحطی انرژی حل نخواهد شد، چون ذخایر مواد معدنی در اقشار سطحی زمین محدودند.

ولی هم اکنون می‌توان منبع انرژی واقعا پایان‌ناپذیری را نشان داد. منظور ما در اینجا فعل و انفعالات دما هسته‌ای است. این فعل و انفعالات تنها در درجات گرمای فوق‌العاده زیاد حدود ۲۰ ملیون درجه امکان‌پذیر میگردند. فعل این دما تنها در انفجارهای اتمی قابل حصول است.

امروزه در مقابل پژوهشگران مسئله دستیابی بدرجات فوق الذکر حرارت بدون توسل به انفجار مطرح است و نخستین کوششها در این راه توام با کامیابی بوده به حصول دمای یک میلیون درجه‌ای انجامیده است.

اگر فیزیکدانان بتوانند دمای چند ده میلیون درجه‌ای لازم را از راه غیر انفجاری ایجاد کنند، فعل و انفعال هدایت شونده پیوستن هسته‌ای اتمهای هیدروژن بهم (این فعل و انفعال را دما هسته‌ای می‌نامند) ممکن میگردد و از هر کیلوگرم هیدروژن مقدار عظیمی انرژی آزاد خواهد شد. برای تامین انرژی سالانه مورد احتیاج بشر در سطح مصرف امروزی آن انرژی دما هسته‌ای که از ده میلیون تن آب بدست میآید کافیست.

در اقیانوسها آنقدر انرژی دما هسته‌ای انباشته است که می تواند برای برطرف ساختن تمام حوائج انسان به انرژی در مدتی که از طول عمر منظومه شمسی بیشتر است تکافو کند. و این همان منبع واقعاً پایان ناپذیر انرژی است.

موتورها

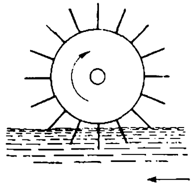
انسان سده بیستم عادت کرده است از موتورهای مختلف که کارهای بزرگ وی را انجام میدهند، زحمتش را آسان میکنند و نیرویش را ده‌ها چندان می نمایند استفاده کند.

تا امروز هم در کشاورزی بسیاری از کشورها آسیابهای بادی هنوز متداول هستند. این ساده‌ترین گردونه که از نیروی باد استفاده میکند، قرنهاست که در خدمت انسان قرار دارد. پره‌های مسطح چرخ بادگردان این ماشین نسبت بجهت وزش باد تحت زاویه معینی

27*

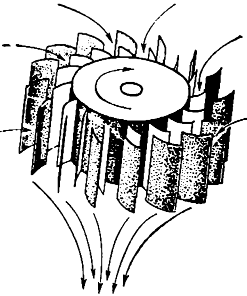
قرار داده میشوند. جریان هوا به پره‌های چرخ خورده آنرا بحرکت درمیاورد.

روشن است که گردونه‌های بادی را می‌توان در جهت معکوس نیز بکار گرفت. اگر با موتوری چرخ بادگردان را بگردش درآوریم پره‌های آن در امتداد محور چرخش جریانهای قوی هوا ایجاد خواهند کرد. اگر چنین دستگاهی بر روی قایق موتوری، هواپیما و یا هلیکوپتر نصب گردد نام پروانه بخود خواهد گرفت. واکنش جریان هوائی که پروانه ایجاد میکند باعث کشش قایق، پرواز هواپیما و یا بلند شدن هلیکوپتر میشود. گمان میرود که نخستین موتوری که انسان برای رفع نیازمندیهایش از آن استفاده کرده است، توربین آبی (هیدرولیک) به ابتدائی ترین شکل آن باشد.



شکل ۱۳۳

شکل ۱۳۳ چرخ آبگردانی را نشان میدهد. آب جاری ضمن برخورد به پره بخشی از انرژی سینتیک خود را بدان منتقل میسازد که منجر به حرکت پره و چرخ متصل بدان میشود. پیداست که در هر لحظه مشخص فقط یک پره می‌تواند بطور عمود در مقابل جریان آن قرار گیرد. مابقی پره‌های واقع در آب با سمت جریان آن زاویه حاده تشکیل داده و نتیجتاً میزان انرژی دریافتی آنها از پره عمود بر جهت حرکت آب کمتر است. ضریب کارآئی چنین چرخی زیاد نیست. راه ازدیاد ضریب کارآئی مشخص است: باید تمام پره‌هائی را که در یک لحظه معین در آب واقعند، طوری قرار داد که بر جریان آب عمود باشند. برای این منظور از دستگاه سمت دهنده استفاده میشود. از شکل ۱۳٤ پیدا است که برای کار موفقیت‌آمیز این توربین وجود اختلاف سطح آب ضروری است. ما باین ترتیب به نیروگاه برق آبی امروزی که سد نیرومندش با توان عظیمی توده‌های آب را روی پره‌های توربین آن میریزد رسیدیم. توربین‌های هیدرولیکی که امروزه در سطح عالی مهندسی میسازند، دارای توانی بیش از صد هزار کیلووات و ضریب کارآئی نزدیک به ٪۹۵ می‌باشند. از آنجا که این توانها با تعداد دورهای



شکل ۱۳٤

نسبتاً کمی (در حدود ۱۰۰ دور در دقیقه) بوجود میآیند، وزن و ابعاد توربین های هیدرولیکی امروزی حیرت آور میشود. مثلاً ارتفاع چرخ توربین نیروگاه برق آبی والگا بنام لنین در حدود ۱۰ متر و وزن آن ٤۲۰ تن است.

برتری توربین در سادگی فوق‌العاده تبدیل حرکت مستقیم آب به حرکت دورانی است. از اینرو اصل مزبور در موتورهائی هم که ظاهراً با چرخ هیدرولیکی تشابهی ندارند نیز بصورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار میگیرد. اگر بجای آب بخار بر پره‌ها فشار بیاورد توربین را بخاری می‌نامند. میدانیم که برای ارتقاء ضریب کارائی باید درجه گرمای چرخ متحرک (رتور) را بالا برد. در نیروگاههای برق حرارتی امروزی، بخار در حین ورود به توربین دارای حرارتی معادل ۵۸۰ درجه سانتیگراد و فشار ۲٤۰ آتمسفر است. حد تئوریک ضریب کارآئی چنین توربینی در شرایطی که دمای محیط سردکننده فرضاً $20°C$ باشد می‌تواند به ٦٦ درصد برسد، ولی در عمل از ٤۲ درصد تجاوز نمیکند. بدین ترتیب توربین‌های بخاری از جمله موتورهای خوب امروزی بشمار میآیند و توان یک دستگاه آنها تا ۳۰۰ هزار کیلووات میرسد. مصرف چنین توربینی ۹۰۰ تن بخار با فشار قوی در یکساعت است. اما لازم بتوضیح نیست که تولید اینقدر بخار از لحاظ فنی کار ساده‌ای نیست. امروزه دیگهای بخار بافشار زیاد و دستگاه تهیه و

27—1300

رساندن سوخت بخش اعظم یک‌نیروگاه برق حرارتی را اشغال میکنند. باین جهت مورد استفاده ازآنها در وسائط نقلیه تنها به کشتی‌های بزرگ محدود میشود.

در سالهای اخیر در مطبوعات بنام کشتی های توربوالکتریکی برخورد میشود. معنی واژه توربوالکتریکی روشن است: در اینگو نه کشتی‌ها نیروی بخار توربین هارا بحرکت در میآورد، توربین‌ها نیز بنوبه خود مولدهای جریان مستقیم و مولدها موتور های برقی را بچر خش در میاورند. پروانه کشتی روی محور موتورهای برقی نصب‌میشود. این سئوال پیش میآید که آیا این سیستم پیچیده و مرکب زائدنیست؟ چرا پروانه را بدون واسطه به محور توربین نصب نمیکنیم؟ در اینجا ما به مساله‌ی تازه‌ای بر میخوریم و آن — کیفیت کششی موتور است.

مطلب از اینقرار است که توان توربین بخار تنها ضمن تعداد دور کاملا معینی بحداکثر مقدار خود میر سد، مثلاً در مورد توربین‌های قوی نیرو گاههای برق این تعداد ۳۰۰۰ دور در دقیقه است. اگر تعداد دور کم شود از توان کاسته میشود. روشن است که اگر پروانه کشتی مستقیماً بر روی محور توربین نصب شود کیفیت کششی چنین سفینه ای در درجه نازلی قرار خواهد داشت. بر عکس موتور برقی جریان مستقیم دارای کیفیت کششی ایده‌آل است. هر چه نیروی مقاومت بیشتر با شد نیروی کشش این موتور نیز بیشتر میشود بنابراین در حین گردش با تعداد دور کم که مختص لحظه کننده شدن ازجا و شروع حرکت است توان بیشتری ایجاد میشود.

بدینسان مولد و موتور الکتریکی جریان مستقیم واقع بین توربین و پروانه کشتی نقش جعبه دنده خود کار پیوسته‌ای را که بسیار کامل است ایفا میکنند. ممکن است چنین سیستمی تا حدی حجیم بنظر رسد. اما با در نظر گرفتن توان زیاد کشتی های تور بوالکتر یکی امروزی هر سیستم دیگری بهمین اندازه حجیم خواهد بود در عین اینکه اطمینا نبخشی کمتری هم خواهد داشت.

از سوی دیگر، نیروگاه کشتی های توربوالکتر یکی را با تعویض دیگهای بخار حجیم با رآکتور اتمی میتوان بمیزان قابل ملاحظه‌ای تکامل بخشید. این کاریست با صرفه و کشتی را از حمل مقادیر زیادی سوخت در راه معاف میدارد.

نخستین کشتی یخ‌شکن اتمی شوروی بنام «لنین» شهرت جهانی یافته است. توان موتورهای آن ۴۴ هزار اسب بخار و ظرفیت آن ۱۶۰۰۰ تن میباشد. نیروگاه هسته‌ای این کشتی حرکت بیش از یک ساله آنرا بدون سوخت گیری تامین میکند.

بدین ترتیب توربین بخار احتیاج به منبع خارجی جریان گرمائی نیرومندی دارد. در سطح امروزی تکنیک خواه سوختگاه دیگهای بخار و خواه رآکتور اورانیمی باندازه‌ای بزرگ و سنگین هستند که نصب توربین بخاری روی اتومبیل یا هواپیما مناسب نیست. وزن کل موتور و دستگاه گرم کننده نسبت بیک اسب بخار نیروی تولیدی بسیار زیاد است. آیا نمیشود از گرم‌کن خارجی با قرار دادن آن در داخل توربین رهائی یافت؟

پاسخ این پرسش مثبت است. چنین دستگاهی ساخته شده ووسیعاً مورد استفاده قرار میگیرد. نام این دستگاه توربین گازی است و در آن نقش عامل کارگر مستقیماً برعهده‌ی محصولات گداخته احتراق سوخت بسیار گرمازا محول گشته است. استفاده مستقیم از گازهای احتراق از یک سو مبین امتیاز اساسی توربین گازی نسبت به توربین‌های بخاری است و از سوی‌دیگر تامین کار مطمئن توربین را با اشکالاتی مواجه میسازد.

برتریهای تور بین گازی آشکار است: سوختگاه آن کوچک است و میتواند زیر رو پوش توربین جا داده شود و گازهای حاصله از احتراق مخلوط سوخت (مثلاً مخلوط نفت سفید و اکسیژن) دارای آنچنان دمائی هستند که برای بخار امکان‌ناپذیر است. جریان گرمائی که در سوختگاه توربین گازی بوجود میاید بسیار شدید است بنحوی که امکان حصول ضریب کار آبی بالائی را تامین میکند.

اما این برتریها نارسائیهائی را نیز باعث میشوند. پره‌های فولادین توربین در جریان گاز دارای حرارت ۱۲۰۰° C که ناگزیر از ذرات میکروسکوپی خاکستر اشباع شده است کار میکنند. از اینرو بآسانی میتوان تصور کرد که موادی که تور بین گازی از آنها ساخته میشود باید واجد چه کیفیات فنی سختی باشند. در جریان کو شش بخاطر ساختن توربینی با توان ۲۰۰ اسب بخار برای استفاده در اتومبیل سواری مشکل خاصی پیش آمد. توربین باندازه‌ای کوچک از آب در آمد که

راه حل‌های معمولی مهندسی و مصالح و مواد عادی برای عملی ساختن آن غیر قابل استفاده بودند. اما این مشکلات فنی مرتفع شده‌اند و نخستین اتومبیلهای دارای توربین گازی اکنون سرحله آزمایشی خودرا میگذرانند.

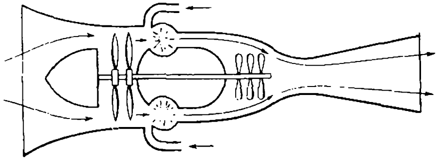
استفاده از توربین گازی در نقلیات راه آهن آسانتر عملی شد. اکنون لکوموتیوهای دارای توربین گازی دیگر بتدریج جای خود را باز میکنند.

اما راه استفاده گسترده از توربین گازی بوسیله موتورهای دیگری هموار شد که در آنها توربین گازی هرچند بخش ضروری موتور است، ولی جزء ترکیبی تابع میباشد. منظور موتورهای توربوجتی است که در حال حاضر موتور اصلی هوا پیماهای جت را تشکیل میدهند.

اساس موتور جت بسیار ساده است. در محفظه مستحکم سوختگاه مخلوط سوخت محترق میشود. گازهای حاصله از احتراق که دارای سرعت فوق‌العاده زیادی هستند (m/sec ۳۰۰۰ درصورت سوزاندن مخلوط هیدروژن و اکسیژن و قدری کمتر برای سوخت های دیگر) از درون لوله‌ی شیپوری که بتدریج کشاد میشود گذشته و در جهت مقابل حرکت بخارج پرتاب میشوند. در نتیجه‌ی سرعت خیلی زیاد خروج گاز حتی احتراق مقدار نسبتاً کمی سوخت قادر بایجاد نیروی محرکه‌ی بسیار زیادی است.

با پیدا شدن موتور های جت، بشر امکان واقعی عملی ساختن پرواز بین سیارات را بدست آورد.

در سالهای اخیر موتورهای جت مایع سوز رواج بسیاری یافته اند. به محفظه‌ی احتراق اینگونه موتورها به نسبتهای معین از مواد سوخت (مثلاً، الکل اتیلیک) و سوزاننده (معمولاً اکسیژن مایع) که باهم مخلوط محترقه را تشکیل میدهند تزریق میکنند. مخلوط محترق میشود و با احتراق خود نیروی کشش ایجاد میکنند. نیروی کشش موشک‌های مخصوص پرواز به ارتفاعات بالا از نوع $V-2$ حدود ۱۵ تن میباشد. در این موشک ۸٫۵ تن مواد سوخت و سوزاننده ریخته میشود که در مدت ۱٫۵ دقیقه میسوزد. این ارقام بخودی خود بقدر کافی گویا هستند. موتورهای جت مایع سوز تنها برای پرواز در ارتفاعات زیاد و یا خارج از جو زمین مناسبند. ریختن مقدار زیادی ماده‌ی سوزاننده‌ی مخصوص به هواپیمائی که برای پرواز در اقشار تحتانی



شکل ۱۳۵

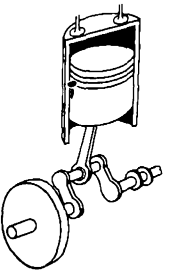
جو زمین (تا ارتفاع ۲۰ کیلومتر)، که در آن اکسیژن بحدکافی وجود دارد در نظر گرفته شده است، کاری است زائد. اما، در اینجا مشکل رساندن مقادیر معتنابهی هوای لازم برای سوخت شدید به محفظه‌ی احتراق بمیان می‌آید. این مسئله خیلی طبیعی حل میشود، باینمعنی که بخشی از انرژی جریان گاز ایجاد شده در محفظه‌ی احتراق را برای چرخانیدن کمپرسور پر قدرتی که وظیفه‌اش رساندن هوا به محفظه است مورد استفاده قرار میدهند.

قبلاً گفتیم بوسیله چه موتوری میتوان بحساب انرژی سیل گازهای گداخته کار انجام داد. این همان توربین گازی است. مجموعه‌ی سیستم را موتور توربوجت می نامند (شکل ۱۳۵). موتور توربوجت برای پروازهای باسرعت از ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ کیلومتر درساعت بی‌رقیب است.

برای پروازهای دور با سرعت ۶۰۰ تا ۸۰۰ کیلومتر درساعت برروی محورموتور توربوجت مضافاً پروانه معمولی نصب میگردد و در اینصورت موتور توربو پروپ یا توربوهلیس نامیده میشود.

در سرعتهای پرواز نزدیک به ۲۰۰۰ کیلومتر در ساعت ویا بیشتر فشار هوای شکافته شده بوسیله بدنه هواپیما بحدی زیاد است که نیاز به کمپرسور از بین میرود. در اینصورت بالطبع توربین گازی نیز لازم نیست. موتوربشکل لوله‌ای با مقطع متغیر در میآید که در بخش کاملاً معینی از آن احتراق سوخت انجام میگیرد. اینگونه موتور را موتورجت آئرو ترمیک مینامند. واضح است که موتورجت آئروترمیک قادر به بلند کردن هواپیما از زمین نیست، چونکه تنها درسرعتهای زیاد است که این موتور بکار میافتد.

بعلت مصرف زیاد سوخت کار برد موتورهای‌جت برای پروازهای کم سرعت مقرون به صرفه نیست.



شکل ۱۳۶

در جریان حرکت روی زمین و آب ویا در هوا با سرعتهای از صفر تا ۵۰۰ کیلومتر در ساعت موتورهای پیستون دار درون سوز بنزینی و یا دیزلی با اطمینان خدمات انسان را انجام میدهند. همانطور که از نام این موتورها پیداست قسمت عمده آنهارا سلنیدری که پیستون در داخل آن حرکت میکند تشکیل میدهد. حرکت متناوب و رفت و آمدی پیستون بکمک مکانیزم دسته و میل‌لنگ به حرکت دورانی تبدیل میشود (شکل ۱۳۶) حرکت پیستون بوسیله دسته به بازوی میل لنگ انتقال مییابد و در نتیجه میل‌لنگ بچرخش در میاید. بعکس، اگر میل‌لنگ را بچرخانیم دسته پیستون به نوسان در آمده و خود پیستون در داخل‌سیلندر بالا و پائین خوا هد رفت.

سیلندر موتور بنزینی دارای دوسوپاپ است که یکی از آنها برای دخول مخلوط سوخت و دیگری برای خروج گازهای حاصله از احتراق در نظر گرفته شده است. برای اینکه موتور شروع بکار کند بایستی با استفاده از انرژی یک منبع خارجی مقدمتاً آنرا چرخاند. فرض کنیم در لحظه معینی پیستون روانه پائین شده وسوپاپ ورودی باز است. در این حالت مخلوط ذرات بنزین وهوا بداخل سیلندر مکیده میشود. سوپاپ ورودی طوری با میل موتور مربوط است که هنگام رسیدن پیستون به موضع تحتانی مدخل سیلندر بسته میشود. پیستون در صورت ادامه چرخش میل‌لنگ روانه بالا میشود. دستگاه خودکار حرکت سوپاپها در این هنگام آنهارا بسته نگاه میدارد. در نتیجه مخلوط سوخت متراکم میشود. همینکه پیستون بحد فوقانی درون سیلندر رسید مخلوط متراکم بوسیله جرقه الکتریکی فروزان بین الکترودهای شمع احتراق شعله‌ور میشود. در جریان احتراق مخلوط گازهای حاصله منبسط شده و پیستون را بشدت بپائین میرانند و در نتیجه به میل لنگ تکان وارد

شده و چرخ طیار واقع بر روی آن مقدار قابل ملاحظه‌ای انرژی سینتیک میاندوزد. بحساب این انرژی هر سه مرحله بعدی تدارک: ابتدا مرحله تخلیه که ضمن آن سوپاپ خروجی باز است و پیستون بالا میرود و در مسیر خود گازهای احتراق یافته را از سیلندر بیرون میراند، بعد مرحله تنفس که همان مکیدن مخلوط سوخت بدرون سیلندر است و مرحله تراکم است و سپس از نواشتعال رخ میدهد. باین ترتیب موتور براه میافتد.

توان موتورهای بنزینی از بخشی از اسب‌بخار تا ۴۰۰۰ اسپ بخار میباشد و ضریب کارآیی آنها تا ۴۰ درصد میر سد. وزن این موتورها نسبت به‌هر اسب‌بخار از ۳۰۰ گرم تجاوز نمیکند. استفاده گسترده از این موتورها را در اتومبیل و هواپیما باید معلول همین شاخص های مناسب دانست.

راه ارتقاء ضریب کارآیی موتورهای بنزینی چیست؟ راه عمده — افزایش درجه تراکم است . از آنجا که هوای اطراف برای تمام موتورهای گرمائی و سائط نقلیه نقش سرد کننده را ایفا میکند، ارتقاء کارآیی تنها از طریق افزایش دمای مخلوط گاز عمل‌کننده میسر است و برای نیل بدین امر باید قبل از احتراق مخلوط را هر چه بیشتر فشرد. اما در این راه مشکلاتی جدی بروز میکند. مخلوط ضمن فشرده شدن خودبخود منفجر میشود (به صفحه ۴۰۱ نگاه کنید) و نتیجتاً مرحله کار با انفجار شدید توام گشته و ممکنست به موتور آسیب واردآید. برای کاهش خواص انفجاری بنزین باقدامات ویژه ای متوسل میشوند که موجب بالا رفتن بهای سوخت — که بدون آنهم گران است — میشود (به صفحه ۴۰۲ نگاه کنید) مسائل افزایش درجه گرما در مرحله‌کار، ازبین بردن انفجار و پائین آوردن بهای سوخت هر سه در موتورهای دیزل بنحو موفقیت آمیزی حل شده‌اند.

ساختمان موتورهای دیزلی و بنزینی شباهت بسیاری باهم دارند، منتهی موتور دیزلی برای استفاده از فراورده‌های ارزانتر و از نظر کیفی نازلتر نفتی تخصیص یا فته است.

سیکل این موتور با مکیدن هوای خالص به سیلندر شروع میشود و سپس هوا بوسیله پیستون تقریباً تا ۲۰ آتمسفر متراکم میگردد. از

آنجا که رساندن بدین درجه تراکم از طریق چرخش موتور با دست بسیار مشکل است، معمولاً دیزل را بوسیله موتور راه‌انداز بنزینی ویژه ویا با استفاده از هوای فشرده براه میاندازند.

در جریان این تراکم شدید درجه حرارت در سیلندر تا حد لازم برای احتراق مخلوط محترقه بالا میرود. اما چطور میتوان ماده سوختنی را به سیلندری که تحت‌فشار زیاد قرار دارد وارد نمود؟ سوپاپ ورودی در اینجا بدرد نمیخورد و بجای آن از افشانک که از روزنه بسیار باریکی سوخت را بدرون سیلندر تزریق میکند استفاده میشود. سوخت بتدریج که وارد سیلندر میشود محترق میگردد و باین ترتیب خطر انفجار که خطر بزرگی برای موتورهای بنزینی است، از بین میرود. رفع خطر انفجار امکان ساختن موتور های دیزل با توان هزاران اسب‌بخار را برای کشتی های کندرو فراهم میسازد. این موتورها طبیعتا بزرگ از آب در میآیند، اما در مقایسه با دستگاه مرکب از توربین و دیگ بخار جمع وجورتر هستند. به کشتی های مجهز به موتورهای دیزل در فرهنگ واژه‌های فنی ما بدون محمل منطقی خاصی نام «تپلوخود»* داده شده است. کشتی‌هائی را که بین موتور دیزل و پروانه آنها مولد و موتور برق جریان مستقیم قرار دارد، دیزلی الکتریکی مینامند. لکوموتیوهای دیزلی معمول در راههای آهن نیز برطبق همین اصل ساخته شده اند و بنابراین دیزلی‌الکتریکی شمرده میشوند.

موتورهای پیستونی درون سوز موردبحث ما، عناصر اصلی ساختمانی خود را که سیلندر، پیستون و شیوه تبدیل حرکت مستقیم متناوب به حرکت دورانی بوسیله مکانیزم شاتونی میل لنگ باشد از سلف خود — ماشین بخار که بتدریج از صحنه خارج میشود اقتباس نموده‌اند. ماشین بخار را میتوان موتور پیستونی «بیرون سوز» نا مید. همانا تلفیق دیگ بخار سنگین و بزرگ ابعاد بادستگاه تبدیل حرکت مستقیم به چرخشی که از لحاظ ابعاد دست کمی از آن ندارد است که ماشین بخار را از امکان رقابت موفقیت آمیز با موتور های جدید محروم ساخته است. برای اینکه بدین گفته پی بریم کار ماشین بخار دو مرحله‌ای را مورد بررسی قرار میدهیم.

---

* گرمارو. مترجم

بخار از دیگ‌بخار وارد محفظه‌ای میشود که درون آن، دریچه تقسیم — سوپاپ دارای شکل مخصوص جابجا میشود. دریچه تقسیم بکمک مجموعه ای از اهرمها طوری با پیستون مربوط است که تحت تاثیر آن جابجا شده و به تناوب منفذ دخول بخار را بروی دو قسمت مختلف سیلندر باز میکند. بنابراین در هرلحظه‌درون سیلندر مقدار بخار با فشار قوی وجود دارد. ممکن است بنظر برسد که ماشین بخار بعلت نداشتن مراحل تدارک و اینکه هرکدام از مراحل آن مرحله کار است از موتور بنزینی بهتر است. اما این قضاوتی است سطحی و بکلی نادرست.

نباید فراموش کرد که تعیین کننده ضریب کار آئی نسبتاً مناسب موتور بنزینی دمای زیاد گازهایی است که پیستون را میرانند. میدانیم که برای افزایش کارآیی توربین بخار از بخار با فشار زیاد و دارای درجه حرارتی که لوله‌های عبور بخار و پروانه‌های توربین را گداخته میسازد، استفاده میشود. در اینجا باید درنظر داشت که پروانه‌های توربین آزادانه و بدون اصطکاک با سطوح فلزی حرکت میکنند... حال تصور کنید برای خیالبافی که با ارتقاء درجه حرارت بخار قصد «بهبود» ماشین بخار را دارد وادار ساختن پیستون گداخته بحرکت درون سیلندر همان اندازه گداخته، در شرائطی که برای جلوگیری از افت‌فشار حدود ۶۰۰ آتمسفر پیستون باید تا حد ممکن به سیلندر چسبان باشد، با چه مشقاتی توام خواهد بود. اگر حتی کسی معجزه نوآوری از خود نشان داده و تصادفاً موفق بساختن چنین ماشینی شود، باز هم ضریب کار آیی آن از توربین که با بخار دارای همین مشخصات کار میکند بعلت سهولت عملی ساختن چرخش در توربین، کمتر و وزن و اندازه‌های آن از موتور درون‌سوز هم‌توان خود بزرگتر خواهد بود.

ضریب کارآئی ماشین های بخار معاصر در حدود ۱۰٪ است. لکوموتیوهای بخاری که اکنون دیگر از عرصه تولید خارج گشته‌اند قریب ۹۵٪ از انرژی سوخت را بدون استفاده از دهانه دود کش بهدر میدادند.

علت این سطح نازل «رکوردی» ضریب کار آئی را باید در تنزل اجباری کیفیات دیگهای بخار مخصوص نصب روی لکوموتیو نسبت به دیگهای بخار ثابت دانست.

پس چرا ماشین های بخار مدتی چنان طولانی در حمل و نقل بصورت گسترده مورد استفاده قرار میگرفتند؟ بغیر از علت دلبستگی انسان به راه حلهای آشنا پاسخ این پرسش را باید در مشخصات کششی خوب ماشین های بخار دانست. در این ماشینها هر چه حرکت پیستون در سیلندر سبب مقاومت بار با اشکال بیشتری مواجه شود فشار بخار بر آن نیز بیشتر میشود. در نتیجه گشتاور چرخاننده ماشین بخار در شرائط لازم افزایش میيابد و این در جریان حمل و نقل عامل کم اهمیتی نیست. اما با همه اینها عدم ضرورت دستگاههای معضل انتقال متغیر به محورهای حرکت‌دهنده در ماشین بخار بهیچوجه قادر به جبران نارسائی اساسی این ماشین که همانا نازل بودن ضریب کارآئی است نمیباشد. همین عامل بود که در کار کنار گذاشتن ماشین بخار از میدان بوسیله موتورهای دیگر نقش قاطع را داشت.

تموج

باز میگردیم به اصل دوم ترمودینامیک ــ قانون بزرگی که جریان پدیده‌های طبیعی را هدایت میکند. قبلاً دیدیم که جریانهای خودرو سیستم را به محتمل ترین حالات یعنی افزایش انتروپی سوق‌میدهند. پس از رسیدن انتروپی بمیزان حداکثر دگرگونی آتی سیستم متوقف شده وحالت تعادل فرا میرسد.

اما حالت تعادل ابداً بمعنی آرامش درونی نیست. در درون هر سیستم پیوسته حرکت گرمائی شدیدی در جریان است. بنابراین، دقیقتر، هرجسم فیزیکی در هر آن دستخوش دگرگونی است، یعنی در هرلحظه «جسم دیگر خودش نیست» و آرایش متقابل مولکولهای آن در هر لحظه با لحظه پیشین متفاوتست. بدین ترتیب کلیه مقادیر و مشخصات فیز یکی تنها «بطور میانگین» حفظ میشوند. آنها با محتمل ترین مقادیر خود کاملاً برابر نیستند، بلکه در جوار این مقادیر نوسان میکنند. انحراف از محتمل ترین مقادیر متعادل را تموج نامند. مقادیر تموجهای مختلف بسیار ناچیز است. هرچه قدر تموج بیشتر باشد احتمال وقوع آن کمتر است.

قدر میانگین تموج نسبی، یعنی سهم تغییراتی که در کمیت

فیزیکی مورد نظرما تحت تاثیر جنبش درهم و برهم گرمائی مولکولها صورت میگیرد با عبارت $1/\sqrt{N}$ نشان داده میشود. در اینجا N شمارهٔ ملکولهای یک جسم و یا بخش مورد مطالعه آنست. بدینسان تموجات در سیستم های مرکب از تعداد کم و محدودی ملکول مشهودند و برای سیستم‌های بزرگ شامل میلیاردها میلیارد مولکول بکلی نا مشهود میباشند.

فرمول $1/\sqrt{N}$ نشان میدهد که در یک سانتیمتر مکعب گاز چگالی، فشار، دما و همه خواص دیگر میتوانند باندازه $\frac{1}{\sqrt{3\times10^{19}}}$، یعنی تقریباً 10^{-8}٪ دگرگونی یا بند. اینگونه تموجات ناچیز تر از آنند که بتوان آنها را از طریق تجربه آشکار ساخت.

اما در حجم برابر یک میکرون مکعب وضع دیگری حکمفرماست. دراینجا $N=3\times10^{7}$ است و تموج بچند صدم درصد میرسد.

تموج پدیده ایست «غیر عادی» بدینمعنا که باعث گذار از حالت محتمل تر به حالت با احتمال کمتر میشود. هنگام تموج گرما از جسم سرد به گرم انتقال میبا بد، پراکندگی یکنواخت ملکولها نقض میشود وحرکت مرتب و منظم بوجود میآید.

شاید بتوان بر اساس این تخلفات گر دونه جاوید نوع دوم را بمرحله عمل در آورد؟

توربین بسیار ریزی را که در گاز رقیق قرار دارد در نظر مجسم سازیم و ببینیم آیا نمیشود کاری کرد که این ماشین کوچک نسبت بهمه تموجات همسوواکنش داشته باشد؟ مثلاً، در صورت تفوق عددی مولکولهای متحرک براست بر مولکولهای متحرک بسوی چپ اندکی چرخش پیدا کند؟ این تکانهای کوچک را سپس میشد روی هم گذاشت و با هم جمع کرد و سر انجام کار بوجود آورد. باین ترتیب اصل غیر ممکن بودن گردونه جاوید نوع دوم مردود میگشت.

اما متاسفانه ساختن چنین دستگاهی اصولاً غیر ممکن است. بررسی مشروح مطلب که در آن این نکته در نظر گرفته شود که توربین کوچک دارای تموجات مخصوص خود میباشد و این تموجات هرقدر اندازهٔ توربین کوچکتر باشد بزرگتراند، نشان میدهد که تموجات

بطور کلی قادر بانجام کار نیستند. هر چند موارد نقض گرایش به تعادل لاینقطع در اطراف ما رخ میدهند معذلک قادر نیستند سیر ناگزیر و اجتناب نا پذیر جریانهای فیزیکی بسوی فزایندهٔ احتمال حالت، یعنی تزاید انتروپی را تغییر دهند.

انتروپی و تکامل گیتی

رودها به پائین سرازیر میشوند و سنگها از دامنه کوهساران فرو میغلطند اصطکاک از تحرک اجسام میکاهد و حرکات نسبی منقطع میشوند. اجسام گرم بسردی و سرد به گرمی میگرایند. گرمای تمام اجسام جهان متعادل میشود — چنین است سیر ناگزیر رخدادها از دیدگاه قانون افزایش انتروپی.

در نظر اول مثل اینکه همه چیز روشن است. اما اگر دقت کنیم متوجه جانب نامفهوم قضیه خواهیم شد. حال که طبیعت در پی تعادل است، پس‌چرا تا کنون این تعا دل برقرار نشده است؟

در واقع حتی اگر سیستمی خیلی هم غیر متعادل باشد باز زمان لازم برای گذار به حالت تعادل (فیزیکدانان آنرا زمان سستی میخوانند) نمی‌تواند سربه بی نهایت بزند.

گذار سر تا سرگیتی به حالت تعادل میتوانست بدرازا بکشد و فرضاً حتی میلیارد ها سال هم بطول انجامد، ولی بهر صورت گذار از هر حالت بی تعادل به حالت تعادل مدت زمان معینی را دربر میگرفت نه اینکه الی غیرالنهایه بطول می انجامید.

چرا این تعادل میلیارد سال پیش وفرضا حتی میلیارد میلیارد سال قبل فرا نرسیده است؟

این تناقضی است بسیار جدی. از اینجا چنین بر میآید که مجموعه هستی جهان بدانسان که ما آنرا مشاهده میکنیم با قوانین فیزیکی که ما میشناسیم تضادی آشتی ناپذیر دارد.

آیا راه برون‌رفت از این تنگنا در این نیست که مجموعه جهان را تموجی عظیم بیانگاریم؟ جهان در زمان و مکان بی پایان است. گه در اینجا و گه درآنجا تموجی ایجاد میشود — ملکولها گرد هم میایند،

حرکتشان منظم میشود و مثلاً سیستمهائی شبیه منظومه‌ما بوجود میآید. سپس تموج فروکش میکند و محو میشود و درعوض در بخش دیگری از جهان تموج دیگری پدید میآید.

اما این فرضیه با تمام جذبه‌ی خود نمیتواند مورد قبول قرار گیرد. تموجی بدینسان بسیار نا محتمل است. قبلاً دیدیم که احتمال تراکم خودبخود مولکولها در نیمی از ظرف بحجم یک سانتیمتر مکعب تنها یک پدیده از پدیده‌های بیشمار است. با این وصف چگونه میتوان از تموج خلاق کاینات سرئی سخن گفت؟

بدیهی است که چنین توضیحی نمیتواند قانع کننده‌باشد. اعتقاد به صحت آن بسی ساده لوحانه تر است از باورکردن سوگندهای دزدی که ادعا میکند کیف پول شمارا او ازجیبتان نزده، بلکه تموج ملکولهاست که کیف را ازجیب شما بدست او رسانیده است. انصافاً باید گفت که حتی این تموج ادعائی نیز بمیزان غیر قابل تصوری محتملتر از فرضیه تموج در مقیاس همه عالم است که به آن اشاره شد. شاید بتوان بشکل زیر اعتراض کرد. فرضاً هم که احتمال تموج عظیم در مقیاس تمام عالم بسیار ناچیز باشد، این امر نباید مارا دچار شگفتی کند. مگرمن، من‌نوعی، یعنی انسانی که در باره این مطلب دارد بحث‌میکند، خود چیزی بجز تموج هستم؟ موجودیت و هستی من رویدادی است کاملاً نامحتمل، و از اینرو من در بحث پیرامون محتمل و نامحتمل قبل از هرچیز باید در باره خودم قضاوت کنم. واین اعتراض را نیز باید کنارگذاشت.

برای هستی وموجودیت‌ما منظومه شمسی از حد کفایت‌هم بیشتر است، در حالیکه ما جهان نا متعادل را در مقیاسی میبینیم که منظومه شمسی‌ما درقیاس با آن ذره حقیری بیش نیست. امروزه ستاره شناسان بکمک تلسکوپهای قوی تا مسافات $۱۰^{۱۲}$ تا $۱۰^{۱۳}$ بار بیش از اندازه منظومه شمسی باعماق عالم نفوذ کرده‌اند. اگر عالم تموجی بیش نباشد عرصه آن لااقل $۱۰^{۱۲}$ مرتبه بزرگتر از مقیاس لازم برای حیات بشر است. بنابراین واضح است که میزان احتمال وجود ما واحتمال ناچیز تموجی که منجر به آفرینش عالم کاینات بشکل امروزی آن شده باشد باهم قابل مقایسه نیستند.

بدینسان، تضاد تماما بقوت خود باقی میماند. این امر نمایشگر

آنست که تصورات اساسی ما درباره زمان و مکان و همچنین قوانین اساسی که ما تاکنون آنها را خدشه نا پذیر شمرده ایم، از لحاظی نارسائی دارند.

در اینجا دومین‌بار، نارسائی اصولی مکانیک ما در برابرمان قدعلم میکند. ولی اکنون ما نقیصه‌ی تازه‌ای در آن یافته ایم که با مساله‌ی تجدید نظر در مفاهیم، تجدید نظری که لزوم آنرا هنگام آشنائی با خواص غیر عادی هلیوم مایع متذکر شدیم، مربوط نیست. در آنجا صحبت برسر عدم قابلیت کار برد قوانین مکانیک قدیم در مورد ذرات میکرو سکپی بود، درحالیکه این بار ما با عدم‌امکان کار برد دانسته های خود بر مجموعه عالم روبرو میشویم و به نارسائیهائی در بنیاد دانش خود پی میبریم.

میکانیک قدیمی ما ناکارآیی خود را هم برای مجموعه های بسیار بزرگ و هم بسیار کوچک نشان داده است.

امید واریم ما بتوانیم در آینده در باره اینکه چه تغییراتی باید در فرمولبندیهای پیشین قوانین طبیعت وارد کرد که بتوان آن قوانین را در برخی موارد لازم در مورد جهان ذرات و در مواردی دیگر درباره‌ی تمامی عالم‌کاینات بکار برد، با خوانندگان عزیز خود سخن گوئیم.